Éclairer le long terme des villes par une approche prospective : ce que disent nos modèles de la métropole de Bordeaux

Matthieu Denoux

▶ **To cite this version:**

Matthieu Denoux. Éclairer le long terme des villes par une approche prospective : ce que disent nos modèles de la métropole de Bordeaux. Optimisation et contrôle [math.OC]. Université Paris sciences et lettres, 2021. Français. NNT : 2021UPSLM011 . tel-03276473

HAL Id: tel-03276473
https://pastel.hal.science/tel-03276473

Submitted on 2 Jul 2021

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.

PSL UNIVERSITÉ PARIS

THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à MINES ParisTech

Éclairer le long terme des villes par une approche prospective : ce que disent nos modèles de la métropole de Bordeaux

Soutenue par
Matthieu Denoux
Le 2 mars 2021

École doctorale n°84
Sciences et technologies de l'information et de la communication

Spécialité
Contrôle, Optimisation, Prospective

Composition du jury :

Philippe Blanc	Professeur, MINES ParisTech	*Président du jury*
Valéry Masson	ICPEF, CNRS-Météo France	*Rapporteur*
Jacques Teller	Professeur, Université de Liège	*Rapporteur*
Vincent Viguié	Chercheur, CIRED Ponts ParisTech	*Examinateur*
Nadia Maïzi	Professeure, MINES ParisTech	*Directrice de thèse*

MINES ParisTech | PSL

Éclairer le long terme des villes par une approche prospective : ce que disent nos modèles de la métropole de Bordeaux

MATTHIEU DENOUX

Thèse dirigée par NADIA MAÏZI

Centre de Mathématiques Appliquées
École des Mines de Paris
Université Paris Sciences et Lettres

Soutenue le 2 mars 2021

Résumé

Les villes sont au coeur de l'organisation de l'habitat humain et concentrent une part croissante de la population mondiale. Logiquement, elles doivent faire face aux enjeux environnementaux et sociaux que rencontre l'humanité. Elles sont ainsi victimes de la crise climatique et environnementale, subissant les conséquences de la pollution de l'air, des canicules, des inondations, des ouragans, et autres événements intenses. Mais elles sont aussi actrices de ces problématiques parce qu'elles rassemblent souvent les pouvoirs économiques, politiques et sociaux. En outre, la construction des milieux urbains se fait dans la durée, les bâtiments restant en place plusieurs décennies voire siècles et les formes urbaines créant une trame difficilement réversible. Dans ce contexte, il est primordial que les parties de villes que nous construisons aujourd'hui intègrent à la fois les aspects courts termes (financiers, esthétiques, d'adéquations aux besoins des propriétaires ou des commanditaires) mais aussi leurs impacts sur le long terme. Plusieurs visions de la ville telle qu'elle devrait tendre à être ont émergé depuis quelques décennies, de la ville technologique (ou "smart-city") à la ville durable en passant par une ville collective. Dans ce cadre, ce travail propose d'appliquer les principes de la modélisation prospectives aux problématiques d'aménagement urbain pour contribuer à la prise en considération des questions environnementales. Pour nourrir nos modèles, nous décrivons une méthodologie réplicable de création d'archétypes quantitatifs de formes urbaines et de bâtiments à partir de données publiques françaises. Cette approche, basée sur des techniques classiques (analyse en composantes principales et k-means), confirme quelques caractéristiques urbaines comme la difficile définition du périurbain. Notre modèle prospectif est constitué d'un modèle d'optimisation bottom-up basé sur le framework TIMES dont l'originalité réside dans la représentation du sol et de ses usages, d'un deuxième modèle de projection spatiale utilisant des cartes de contraintes et enfin d'un réseau de neurones à convolution servant à estimer les impacts relatifs sur la température des modifications urbaines calculées. Cette chaîne de modélisation est ensuite appliquée à quelques scénarios prospectifs sur la métropole de Bordeaux dont l'impact d'une politique de zéro artificialisation nette.

Abstract

Cities are at the heart of the organization of the human habitat and concentrate a growing share of the world's population. Logically, they must face environmental and social challenges that humanity is experiencing. They are thus victims of the environmental crisis, suffering the consequences of air pollution, heat waves, floods, hurricanes, and other intense events. But they are also actors of these problems as they often bring together economic, political and social powers. In addition, the construction of urban systems is a long-term process, with buildings remaining in place for several decades or even centuries, and urban shapes drawing a grid not easily reversible. In this context, it is essential that parts of cities that we build today integrate both the short-term aspects (financial, aesthetic, adapting to the needs of owners or clients) and their long-term impacts. Several visions of future city, at least how it should tend to be, have emerged over the last few decades, from a technological city (or "smart city") to a sustainable city through a collective city. Within this framework, this work proposes to apply the principles of prospective modeling to urban planning issues in order to contribute to the consideration of environmental issues. To feed our models, we describe a replicable methodology for creating quantitative archetypes of urban shapes and buildings from French public data. This approach, based on classical techniques (principal component analysis and k-means), confirms some urban characteristics such as the difficult definition of the peri-urban area. Our prospective model then consists of a bottom-up optimization model based on the TIMES framework whose originality lies in the representation of the soil and its uses, a second spatial projection model using constraint maps and finally a convolutional neural network used to estimate the relative impacts on temperature of the calculated urban modifications. This modeling chain is then applied to a few prospective scenarios for the Bordeaux metropolitan area, including on the impact of a zero net artificialisation policy.

Remerciements

Finalement, un doctorat est aussi une réconciliation d'échelles. Il réconcilie les échelles temporelles, entre le quotidien, la routine et la construction de savoir scientifique qui a bien besoin des trois années complètes. Il réconcilie les langages de plusieurs domaines, les expertises de plusieurs personnes. Il réconcilie les enjeux. Il réconcilie aussi les trajectoires personnelles, en rapprochant et en embarquant indirectement bien des gens dans l'élaboration d'une thèse cohérente. C'est cette foule de personnes rencontrées, lues, croisées, cotoyées, qui fait la thèse et non la seule personne du doctorant. Ce dernier reste bien humble face à tout cela (mais non contingent). J'aimerais pouvoir citer toutes celles et ceux qui ont contribué directement ou indirectement à ce travail mais je suis sûr d'en oublier une partie !

Pour commencer ces remerciements, je pense aux deux rapporteurs, Valéry Masson et Jacques Teller, et aux membres du jury, Philippe Blanc et Vincent Viguié, qui ont accepté de relire ce long manuscrit et d'évaluer la qualité de cette thèse. Ils représentent à la fois des experts dans les divers domaines que j'ai découverts au cours de la thèse mais également des sujets d'inspiration par leurs travaux. Merci à eux !

Ensuite, bien entendu, je pense à Nadia Maïzi, qui m'a aidé à garder (ou à remettre) les pieds sur terre, à clarifier les brumes dans lesquelles je m'éparpillai régulièrement, à me sortir de ma paresse intellectuelle ou de mes réflexes d'ingénieur pour dessiner les tendances plus larges, et à me faire grandir dans cet exigeant apprentissage de la recherche, heureusement si vaste. J'admire particulièrement l'ensemble du travail qu'elle a mené à la tête du Centre de Mathématiques Appliquées et les sujets de recherche inspirants qui en sont nés, dont la chaire de modélisation prospective. Merci à elle ! Je pense également à Mélusine Hucault, qui m'a fait découvrir le monde de l'ubanisme et toute la richesse des thématiques concomitantes, à ses idées, à son regard critique et incisif, à son dynamisme et à ses aspirations. J'espère qu'elle continuera à trouver un équilibre satisfaisant dans son métier et qu'elle assouvira sa soif de bien construire. Merci à elle !

Pour finir sur le manuscrit, je remercie mes relecteurs et relectrices, Alexandre, Anne-Sophie, Laure, Raphaël et bien sûr mon père et ma grand-mère, qui ont toutes et tous patiemment contribué à la qualité de la rédaction et à la fluidité des phrases laborieusement juxtaposées. Merci à eux !

Cette thèse a commencé à l'agence ANMA, sous l'impulsion de Nicolas Michelin et de Mélusine Hucault qui ont tous deux accepté d'ouvrir leur profession déjà si

riche à un regard extérieur et à des approches bien différentes. Je les en remercie, tout comme je pense à celles et ceux qui m'y ont accueilli, avec lesquels j'ai travaillé pendant les sept mois passés au début de la thèse dans leurs locaux de Paris. Je pense notamment à Adeline, Agrippa, Aimie, Anne-Laure, Armelle, Camille et Camille, Emil, Emmanuel, Jean-Charles, Juliette, Manon, Marielle, Marine, Mathilde, Maxime, Morgane, Nicolas et Nicolas, Paola et Paola, Thomas… Et je dois en oublier ! Je reste admiratif de leurs projets et de leur temps qu'ils ne comptent pas. Je souhaite que l'agence trouve un équilibre sain dans sa nouvelle organisation, elle me semble être entre de bonnes mains ! Je reste frustré que la crise sanitaire ait mis un frein à nos projets de discussions et espère que cette version finale du manuscrit ne marque pas la fin de nos travaux en commun ou a minima leur volonté de prise en compte des enjeux environnementaux dans leurs démarches d'aménagement.

De même, les conditions de vie au CMA sont uniques. Je pense aux doctorants et doctorantes (Amir, Ariane – et Édouard, Arnold, Carlos, Cindy, Dhekra , Gildas, Gratien, Louis, Lucas, Mathilde, Naïma, Paul, Rabab, Rémi, Seung-woo, Thomas, Yacine, Zixuan, et tous les suivants !), chercheuses et chercheurs (Edi, Gilles, Jean-Paul, Sandrine, Sophie, Valentina – et Giulia, Valérie, Welington), stagiaires, responsables administratifs et informaticiens (Alice, Amel, Catherine, Damien, Sébastien). À ces co-rameurs du quotidien. Je les remercie de m'avoir accepté parmi eux. J'ai une pensée particulière pour Valérie qui m'a embarqué dans des projets d'enseignement un peu fous et auxquels j'espère pouvoir continuer de contribuer modestement (et que je ne désespère pas de citer à sa juste valeur dans mes articles), et pour Sandrine qui a été une amie fidèle et inspirante tout au long de ces trois années, avec qui la routine ne me parut pas immuable mais plutôt ouverte à mille idées, qui m'a donné le goût de la valorisation scientifique et de travailler à rendre le laboratoire plus soudé, plus agréable et ses habitants plus loquaces.

Il n'y a pas que le travail dans la vie me dit-on et mes nombreux groupes d'amis ont été des points d'appui solides depuis le début et pour encore longtemps, au gré des déménagements, des crises existentielles, des coups de mou, des confinements et reconfinements. Qu'ils soient Noumaliens (Alice, Clotilde, Cyprien, Estelle, Houssem, Injéh, Laure, Seetie et Simon, Stella, Taoufik…), Potes en Ciel (Adélaïde et Quentin, Antoine, Baptiste, Brice, Caroline, Côme et Côme, Édouard, Maïa et leurs pitchouns, Esther, Gautier, Hermine et Mayeul, Irène, Jean-Noël, Jonathan, Juliette, Louis-Marie D, Louis-Marie O et Shannon, Lucie, Lydie, Marie B, Marie LB, Marie-Victoire, Maud, Noémie, Pexine, Philippine, Pierre O et Marianne, Pierre D, Ségolène, sœur Amadour, Thérèse, Zénon…), des Mines (Alexandre, Anis, Anne-Laure, Benoît, Elina, Guilain, Léna, Raphaël et Valentin, Romain…), collègues doctorants de labeur à PSL-ITI (Clara, Clément, Jonathan, Mathis, Raphaelle, Sophie, Thibaut), locaux de Sophia-Deo (Anne-So et Christophe, Anne-Sophie, Bérénice, Christian, Cyrille, Eva, Ilaria, Joe, Khalil, Marianne, Marie, Marion et sa famille, Mireille, Olivier, Roland, Sabine, Sophie, Viviane, Yannick, Yves-Henri et Rosa…), de la paroisse de Biot (Annie, Christian, Guillaume et Louis-Marc, Michèle et Christian, Paule et Claude, Roger…) ou de la chorale de la messe des jeunes d'Antibes – qui s'est formée bien trop tardivement (Clotilde et sa famille, Jean-Guillaume, Jean-Marie et Ostiane, Marie-Hélène, Marine, Philippine, Sarah, Sigolène, Suzanne et Paul, Sylvain…), colocataires (Agnieszka, Dominique, Elias, Guillaume, Laetitia, Lucie, Perrine, Somar…),

voisins (Sarah et Marc), commerçants (Anne, Hélène, Marianne, Samir…), bibliothécaires (particulièrement Émilie, Yann et Franck), engagés à la Consigne (Cathy, Laurens, Philippe, Viviane…), vagues connaissances (Christine, Didier, Mél, Pascal, Patricia, Tristan et Morgan…) et tous les autres (Emilia, Lina…), je pense bien à eux. Tous ces contacts font véritablement la saveur de la vie et j'ose croire que c'est par là que les transformations de notre société seront supportables. Ces liens nous voient grandir et grandissent avec nous, se modifiant alors que nos regards s'ouvrent.

Enfin bien sûr, je remercie ma famille, Emmanuelle et Yannick, Amélie, Elisa et Margot, Stéphanie, Lucile, Alan et Lisa, Pascal, Settie et leurs minots, Fré et ses enfants, mes grands-parents du sud et du nord, mes parents, Olivier et Marie-Annick, et mes frères, Antonin, Timothée, Baptiste et Raphaël qui ont été eux aussi, qu'ils le veuillent ou non, embarqués là-dedans. Merci à eux d'avoir accepté que je passe souvent en coup de vent pendant les vacances, pour envahir brièvement l'espace par mon besoin de changer d'air, et pour casser les codes bien sûr.

Merci à vous toutes et tous, à toi cher lecteur ou lectrice qui fera, je l'espère, vivre ce travail de recherche pour le rendre bien meilleur que ce qu'il est. Que le Seigneur bénisse toutes ces personnes et les garde dans sa joie !

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 1
Problématique . . . 2
Choix du territoire étudié . . . 3
Plan de la thèse . . . 4

CHAPITRE **1**
LES VILLES FACE À LEURS FUTURS 5
I Les villes aujourd'hui . . . 6
I.1 *Dans le monde* . . . 7
I.2 *En France* . . . 9
I.3 *Bordeaux Métropole, notre territoire d'application* . . . 11
II Les villes, actrices d'une crise mondiale . . . 14
II.1 *La crise environnementale, raison urgente d'évolution* . . . 15
II.1.a Une crise étudiée à l'échelle mondiale . . . 15
II.1.b Les causes imputables aux milieux urbains . . . 17
II.1.c Les risques encourus par les villes dans ce contexte 19
II.1.d Illustration avec le cas des îlots de chaleur urbains 19
II.2 *La justice spatiale, la justice environnementale et les inégalités* 23
II.3 *Des enjeux qui attendent des politiques spatiales* . . . 28
II.3.a Les forces des villes face à l'urgence et l'importance de ces enjeux . . . 28
II.3.b Le rôle de la planification urbaine : urbanisme au centre, et synthèse . . . 29
III Propositions de villes futures . . . 31
III.1 *Formes de villes futures* . . . 32
III.1.a Vers une ville « durable » . . . 33
III.1.b Vers une vision « *technologiste* » de la *smart city* . . . 37
III.1.c Vers une ville intelligente par l'intégration globale et le collectif . . . 42
III.2 *La proposition de la prospective* . . . 44
III.2.a L'humain habite passé, présent et futur . . . 44
III.2.b Le passé comme appui de la conception urbaine . 45
III.2.c La prospective, moyen d'action pour construire le futur . . . 46
III.2.d Du besoin de cadre pratique et d'outils . . . 48
IV L'aménagement urbain . . . 49
IV.1 *Le fonctionnement de l'aménagement en France* . . . 49
IV.1.a Entre théorie et pratique, le vestige de la planification centrale . . . 49
IV.1.b Règlements principaux . . . 51
IV.1.c Formes d'aménagement . . . 51
IV.1.d Acteurs institutionnels . . . 55
IV.1.e La délicate question de la maîtrise du foncier . . 56

IV.2 De grands changements dans la profession 57
IV.2.a État des lieux 58
IV.2.b Nouvelles méthodes de planification et d'organisation 59
IV.2.c L'évolution du rôle des institutions publiques . . 60
IV.2.d Limites de ces approches 60
IV.3 La densité comme caractéristique urbaine emblématique . . . 63
IV.3.a Les différents types de densité 64
IV.3.b La densité, enjeu central du développement urbain 66
V Quelle place pour la modélisation? 71
V.1 « Modèle » scientifique plutôt que « modèle » urbain 72
V.1.a Le modèle dit scientifique, un outil technique de représentation 72
V.1.b Le modèle dit urbain, une ville théorique adossée à une idéologie 74
V.2 Exercices de modélisation urbaine 75
V.2.a Une approche scientifique principalement énergétique 76
V.2.b Modèles *LUTI* 77
V.2.c Une grande diversité d'outils mis à contribution . 78
V.2.d Limites et conclusions pour le placement de notre approche 79
V.3 Le développement d'un modèle basé sur la famille MARKAL/TIMES 80
VI Résumé et formation de la problématique 83

CHAPITRE **2**
LA CRÉATION D'ARCHÉTYPES COMME DESCRIPTION QUANTITATIVE DE LA VILLE 87
I La ville et les données 88
I.1 Un monde de la donnée 88
I.1.a Des révolutions informatiques bien intégrées dans les méthodes scientifiques 89
I.1.b Les données comme conciliation avec la ville existante 92
I.2 Quelles données pour la ville? 93
I.2.a Données urbaines spatiales dans l'histoire des villes 96
I.2.b De l'usage des SIG en urbanisme 97
I.2.c De l'usage des SIG dans la modélisation de la ville 100
I.3 La construction d'archétypes comme description quantitative . 104
I.3.a Les archétypes dans la littérature scientifique sur la ville 104
I.3.b Des archétypes locaux pour comparaison? . . . 108
I.3.c Application à la modélisation 109
I.4 Vers une approche de la ville par les données 109
II Méthodologie de création d'archétypes à partir d'analyse de corrélations et de clustering 110
II.1 Du difficile choix d'une zone et d'un découpage 112
II.1.a Sur l'étendue 113
II.1.b Sur la précision 115
II.1.c Application à Bordeaux Métropole 117
II.2 De la dépendance aux bases de données disponibles 118

II.3 *De l'utilisation d'une Analyse en Composantes Principales pour l'étude des corrélations* . . . 119
II.4 *De l'application du clustering* . . . 120
II.5 *Synthèse* . . . 124
III Choix, récupération et traitements des données pour le clustering 124
III.1 *Description des caractéristiques des formes urbaines* . . . 125
III.1.a Les parcelles . . . 126
III.1.b Les espaces naturels . . . 126
III.1.c Les routes et les transports . . . 128
III.1.d Autres paramètres sur les formes urbaines . . . 131
III.2 *Description des caractéristiques des bâtiments* . . . 131
III.2.a Les caractéristiques morphologiques des bâtiments 131
III.2.b L'âge des bâtiments . . . 133
III.2.c Informations sur la consommation énergétique . 135
III.2.d L'usage des bâtiments . . . 136
III.2.e Les caractéristiques démographiques et sociales . 136
III.3 *Autres indicateurs spécifiques : l'exemple de la porosité* . . . 138
III.4 *La sélection définitive des paramètres utilisés pour la création des archétypes* . . . 140
IV Les résultats de l'approche quantitative appliquée à Bordeaux Métropole . . . 146
IV.1 *Quelques corrélations notables fournies par l'étude des paramètres* 146
IV.1.a Sur les formes urbaines . . . 146
IV.1.b Sur les bâtiments . . . 152
IV.2 *Les résultats des Analyses en Composantes Principales* . . . 156
IV.3 *Des archétypes obtenus cohérents : quelques exemples* . . . 158
IV.3.a De formes urbaines . . . 158
IV.3.b De bâtiments . . . 165
V Conclusion . . . 173

CHAPITRE **3**
DÉVELOPPEMENT D'UNE CHAÎNE DE MODÉLISATION : DE TIMES-URBAN À L'ESTIMATION DE LA TEMPÉRATURE 175
I TIMES-URBAN, un modèle urbain bottom-up original . . . 176
I.1 *Une structure novatrice de système de référence* . . . 177
I.1.a Découpage spatial et temporel . . . 177
I.1.b Système d'aménagement de référence . . . 179
I.1.c Fonction objectif ou de coût . . . 180
I.1.d La demande finale : les besoins de la population . 181
I.2 *De nouvelles façons de décrire les secteurs au sein de TIMES-URBAN* . . . 183
I.2.a Un secteur urbain centré sur l'allocation des sols . 184
I.2.b L'ajout des infrastructures de transport et du temps dans les choix modaux . . . 188
I.2.c Synthèse : une structure centrée sur le sol et son usage . . . 195
I.3 *Une optimisation sous contraintes* . . . 197
I.3.a Limitation de la surface totale aux frontières administratives . . . 198

I.3.b Ajout d'un coût aux archétypes urbains (fonction de l'artificialisation) et par m² aux bâtiments . . 199
I.3.c Limitation des formes urbaines et des bâtiments trop spécifiques (centre historique) 200
I.3.d Limitation de la construction de tours 201
II URBAN-SPATIALIZER, un outil de projection spatiale 202
II.1 Une distribution par allocation optimale entre les IRIS . . . 205
II.2 De la projection spatiale par cartes de contraintes 207
II.2.a Des cartes de contraintes métiers 208
II.2.b Sélection d'une zone de déploiement des modifications 210
III URBAN-TEMPÊST, pour la création d'une carte de macro-paramètre 213
III.1 Utilisation d'une méthode statistique plutôt que physique . . 214
III.1.a Les méthodes existantes d'estimation des températures 214
III.1.b Vers la construction d'un réseau de neurones à partir des données de URBAN-SPATIALIZER 215
III.2 Fonctionnement d'un réseau de neurones : du principe général à une forme adaptée à la spatialité 217
III.2.a La brique fondamentale : le neurone 217
III.2.b Le fonctionnement des réseaux de neurones . . 218
III.2.c Les réseaux de neurones à convolution 219
III.2.d Une structure originale : du voisinage à la température d'un lieu 219
III.3 Données d'entraînement, de validation et de test 221
III.3.a Les paramètres urbains en entrée… 221
III.3.b …et les données de température en sortie 221
III.4 Des résultats d'entraînement prometteurs 223
III.5 Ajustements des sorties de URBAN-SPATIALIZER pour l'application de URBAN-TEMPÊST 224
IV Conclusion 225

CHAPITRE **4**
SCÉNARIOS PROSPECTIFS DE LA VILLE 229
I Présentation du scénario de référence 233
I.1 La projection de la population de l'INSEE 233
I.2 Les contraintes de référence 235
I.3 Résultats du scénario de référence 236
I.3.a En sortie de TIMES-URBAN 236
I.3.b En sortie de URBAN-SPATIALIZER 246
I.4 Le récit prospectif de la ville future 250
II **Scénario** : population doublée pour Bordeaux en 2050 251
II.1 Contexte 251
II.2 Objectifs 252
II.3 Contraintes et développements spécifiques 252
II.4 Résultats du scénario 253
II.4.a En sortie de TIMES-URBAN 253
II.4.b En sortie de URBAN-SPATIALIZER 261
II.5 Le récit prospectif de la ville future 266
III **Scénario** : zéro artificialisation nette 267

III.1 *Contexte* . . . 267
III.2 *Objectifs* . . . 269
III.3 *Contraintes et développements spécifiques* . . . 269
III.4 *Résultats du scénario* . . . 271
III.4.a En sortie de TIMES-URBAN . . . 271
III.4.b En sortie de URBAN-SPATIALIZER . . . 275
III.5 *Le récit prospectif de la ville future* . . . 278
IV **Scénario** : densification autour des axes de transport . . . 279
IV.1 *Contexte* . . . 279
IV.2 *Objectifs* . . . 281
IV.3 *Contraintes et développements spécifiques* . . . 281
IV.4 *Résultats du scénario* . . . 283
IV.4.a En sortie de TIMES-URBAN . . . 283
IV.4.b En sortie de URBAN-SPATIALIZER . . . 294
IV.5 *Le récit prospectif de la ville future* . . . 300
V Un impact flagrant sur la température : résultats de URBAN-TEMPÊST . . . 301
V.1 *La cohérence générale des résultats de URBAN-TEMPÊST* . . . 301
V.2 *Des scénarios de densification peu efficaces sur la température* 301
V.3 *Un scénario de limite de l'artificialisation prometteur* . . . 307
VI Des éléments communs aux différents scénarios . . . 308
VI.1 *Des périphéries largement mises à contribution* . . . 308
VI.2 *La conversion des terrains déjà artificialisés* . . . 309
VI.3 *L'utilisation d'un nombre réduit de archétypes de bâtiments* . 310
VI.4 *Une hausse de température marquée* . . . 311
VII Brèves recommandations de stratégie urbaine . . . 311

CONCLUSION 313
Contributions . . . 313
Limites et perspectives . . . 315

BIBLIOGRAPHIE 319

ANNEXE A
DES VILLES EN COMPÉTITION LES UNES AVEC LES AUTRES 367

ANNEXE B
QUELQUES ÉLÉMENTS RÉGLEMENTAIRES SUR LA VILLE DE BORDEAUX 373

ANNEXE C
DONNÉES RELATIVES AUX 277 IRIS DE LA MÉTROPOLE BORDELAISE 377

ANNEXE D
RÉSULTATS DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES 393
I Formes urbaines . . . 393
II Bâtiments . . . 396

ANNEXE E
DESCRIPTION EXHAUSTIVE DES ARCHÉTYPES DE FORMES URBAINES 401
I Ville dense proche 1 . . . 402
II Banlieue / petites villes 1 . . . 404
III Zone rurale 1 . . . 406

IV Saint-Médard-en-Jalles 408
V Centre historique 410
VI Ville dense proche 2 412
VII Banlieue / petites villes 2 414
VIII Zone d'activités 1 416
IX Zone d'activités 2 418
X Ville dense proche 3 420

ANNEXE F
DESCRIPTION EXHAUSTIVE DES ARCHÉTYPES DE BÂTIMENTS 423
I Large bâtiment d'activité 426
II Zones moyennement denses 428
III Bâtiments de nouvelle banlieue périurbaine 430
IV Zones d'activités avec bureau 432
V Bâtiments forte densité 434
VI Bâtiments de banlieue proche 438
VII ZA de Saint-Médard-en-Jalles 440
VIII Logements de banlieue périurbaine 442
IX Logements anciens de banlieue périurbaine 444
X Bâtiments du quartier historique 446

ANNEXE G
FORMULATION DU PROBLÈME D'OPTIMISATION DE TIMES-URBAN 449
I Définitions 449
I.1 Ensembles 449
I.2 Variables et paramètres 449
I.3 Temporalité et spatialité 450
II Fonction objectif 450
III Le secteur urbain 451
III.1 Les archétypes d'occupation des sols 451
III.2 Les archétypes de bâtiments 452
IV Le secteur du transport 452

ANNEXE H
LA DÉFINITION DE CONTRAINTES DANS TIMES 455
I Les contraintes de base 455
II Les contraintes utilisateurs 456
III La définition de scénarios dans TIMES 458

ANNEXE I
FORMULATION DU PROBLÈME D'OPTIMISATION DE URBAN-SPATIALIZER 459
I Contraintes 460
I.1 Contraintes structurelles 460
I.2 Contraintes stratégiques 461
II Procédure et changements 462
III Perspectives 463

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 Carte de la proportion de la population habitant en milieu rural dans le monde en 2014. 7
Figure 1.2 Évolution de la proportion de la population dans le monde habitant en milieu urbain. 7
Figure 1.3 Carte du rapport entre population urbaine et superficie du pays. 8
Figure 1.4 Évolution et répartition de la population dans les dix plus grandes villes françaises depuis 2006. 9
Figure 1.5 Évolution de la population des villes françaises regroupées selon leur taille. 9
Figure 1.6 Localisation de la métropole de Bordeaux sur le territoire français et comparaison des deux échelles. 11
Figure 1.7 Carte des 28 communes formant la métropole de Bordeaux. 12
Figure 1.9 Comparaison du classement de groupes de villes parmi les pays les plus riches, les plus peuplés et les plus émetteurs de gaz à effet de serre. 16
Figure 1.10 Schéma du phénomène d'îlot de chaleur urbain pour la ville de Paris et ses alentours. 20
Figure 1.11 Éléments influençant la création et l'intensité des îlots de chaleur urbains. 21
Figure 1.12 Évolution du coefficient de Gini des revenus par continent. 23
Figure 1.13 Répartition du coefficient de Gini en fonction du nombre total de membres des foyers fiscaux des communes de plus de 20 000 habitants en France. 27
Figure 1.15 Évolution du nombre de publication sur `Science Direct` pour différentes requêtes relatives à la ville *durable* ou *intelligente*. 32
Figure 1.17 Schéma de la conception ou la révision d'un PLU avec évaluation environnementale. 53
Figure 1.18 Plan guide du quartier des Bassins à Flot de Bordeaux réalisé par ANMA (source : ANMA). 54
Figure 1.19 Variation de morphologie pour le même Coefficient d'Occupation des Sols. 64
Figure 1.20 Comparaison de deux quartiers présentant une densité d'emprise au sol comparable mais fournissant deux paysages urbains bien distincts. 65
Figure 1.21 Évolution de la densité au travers des âges vers une dédensification. 67
Figure 1.22 Courbe de la consommation d'essence par habitant en fonction de la densité d'habitants pour les plus grandes villes du monde. 68

Figure 2.1 Exemple de page d'un document de travail de l'agence sur le quartier de la Jallère et son histoire. 93
Figure 2.2 Premiers exemples de données géographiques spatialisées. 96
Figure 2.3 Exemple d'utilisation du SIG `QGIS` pour la création d'archétypes de bâtiments dans le cadre du projet InSmart. 102
Figure 2.4 Exemple d'une carte enrichie du logiciel produit par Artelys dans le cadre du projet CitInES. 102
Figure 2.5 Évolutions du nombre de parutions par an pour la période 1990 - 2020 pour plusieurs expressions de recherche sur `Science Direct`. 104
Figure 2.6 Exemple de création d'archétypes à partir de nos données. 105
Figure 2.8 Carte du métro parisien. 113
Figure 2.9 Carte de l'occupation des sols autour de Bordeaux Métropole selon les données `Corine Land Cover` du projet `Copernicus`. 115
Figure 2.10 Carte des IRIS de la métropole bordelaise. 118
Figure 2.11 Démonstration de l'effet de l'ACP sur l'ensemble des IRIS de la métropole de Bordeaux. 120
Figure 2.12 Effet du clustering sur l'ensemble des IRIS de la métropole de Bordeaux. 120
Figure 2.13 Exemple de dendrogramme de l'*agglomerative clustering* sur les IRIS de la métropole de Bordeaux. 122
Figure 2.14 Exemple de quelques étapes successives de fusion ou d'agglomération de clusters. 123
Figure 2.15 Définition des archétypes à partir des clusters obtenus par l'application du *k-means* ou du *clustering hiérarchique*, exemple sur l'ensemble des IRIS de la métropole de Bordeaux. 124
Figure 2.16 Résumé des paramètres principaux utilisés pour la caractérisation des formes urbaines. 125
Figure 2.17 Cartes des parcelles dans trois zones différentes (échelles identiques). 127
Figure 2.18 Carte des surfaces d'espaces naturels en absolu et en relatif par rapport aux surfaces d'IRIS. 128
Figure 2.19 Distance moyenne aux arrêts de transport en commun en `m` et en `ln m`. 129
Figure 2.20 Carte de proximité aux arrêts de transport en commun. 130
Figure 2.21 Résumé des paramètres principaux utilisés pour la caractérisation des bâtiments. 132
Figure 2.22 Résultats du procédé d'estimation des valeurs absentes appliqué aux bâtiments dont les hauteurs manquaient dans la BDTOPO. 134
Figure 2.23 Histogramme des erreurs résultant de l'essai d'application de la technique sur 8 000 bâtiments tirés au hasard dont la hauteur est renseignée dans la BDTOPO. 134
Figure 2.24 Échelle des densités selon les types. 137
Figure 2.25 Cartes de certains paramètres utilisés pour la caractérisation des formes urbaines et des bâtiments. 144
Figure 2.26 Corrélation entre le coefficient d'emprise au sol et le pourcentage de surface occupé par de la route. 147

Figure 2.27 Corrélation entre le coefficient d'emprise au sol et le pourcentage de surface occupé par des espaces répertoriés comme verts. . . . 147
Figure 2.28 Corrélation entre le pourcentage de surface occupé par de la route et la taille des parcelles (largeur et longueur). 148
Figure 2.29 Cartes des tailles de parcelles (en ln m^2) et du pourcentage de surface occupée par des routes dans la métropole de Bordeaux. . . . 149
Figure 2.30 Corrélation entre le ratio *longueur de route* sur *surface totale* et le coefficient d'entropie calculé à partir des données *Corine Land Cover*. . . . 149
Figure 2.31 Corrélation entre le coefficient d'emprise au sol et la distance moyenne à un arrêt de transport en commun (bus et tram). . . . 150
Figure 2.32 Corrélation entre le coefficient d'emprise au sol et la distance moyenne à un arrêt de transport en commun (bus et tram). . . . 151
Figure 2.33 Corrélation entre la proportion de chauffage collectif dans les résidences principales et la densité de population. . 152
Figure 2.34 Corrélations entre la présence de garage et la répartition de la date de construction des bâtiments pour deux périodes. 153
Figure 2.35 Corrélation entre la hauteur des bâtiments et la présence de garage. . . . 154
Figure 2.36 Corrélation entre l'utilisation de voitures et la proportion d'anciens bâtiments. . . . 155
Figure 2.37 Corrélations entre la hauteur moyenne des bâtiments et la proportion de surface occupée par des locaux d'activités. 156
Figure 2.38 Variance expliquée par les différents axes de l'ACP pour les bâtiments (en ratio de variance). . . . 157
Figure 2.39 Résultats du clustering pour les sols obtenus par l'algorithme agglomératif. . . . 158
Figure 2.40 Résultats du clustering pour les sols obtenus par l'algorithme du k-means. . . . 159
Figure 2.41 Résultats définitifs des archétypes de formes urbaines obtenus par l'algorithme du k-means.. . . . 160
Figure 2.42 Carte des IRIS de l'archétype « *Banlieues et petites villes* » en 2014. . . . 161
Figure 2.43 Carte des IRIS de l'archétype « *Centre historique* » en 2014. 163
Figure 2.44 Résultats du clustering pour le bâti avec l'algorithme agglomératif. . . . 165
Figure 2.45 Résultats du clustering pour les batiments obtenus par l'algorithme du k-means. . . . 165
Figure 2.46 Résultats définitifs des archétypes de bâtiments obtenus par l'algorithme du k-means.. . . . 167
Figure 2.47 Carte des IRIS de l'archétype « *Larges bâtiments d'activités* » en 2014. . . . 168
Figure 2.48 Carte des IRIS de l'archétype « *Bâtiments à forte densité* » en 2014. . . . 170

Figure 3.1 Schéma d'un exemple de *process*. . . . 177

Figure 3.2 Découpage en 19 zones utilisé par TIMES-URBAN. Les délimitations des communes figurent en pointillés. 178
Figure 3.3 Version simplifiée du Système d'Aménagement de Référence (SAR). 179
Figure 3.4 Tendance de population utilisée comme demande de base. 182
Figure 3.5 Carte des rapports courte et longue distances sur population pour les 19 zones de modélisation. 183
Figure 3.7 Graphe des process de formes urbaines. 184
Figure 3.8 Proportion pour chaque IRIS de sol catégorisé comme « autre » selon le clustering et la définition d'archétypes réalisée au chapitre précédent. 185
Figure 3.9 Graphe des process de bâtiments. 187
Figure 3.10 Schéma simplifié de fonctionnement des technologies du secteur des transports de TIMES-URBAN. 189
Figure 3.11 Schéma d'une infrastructure de mobilité avec indication des efficacités et des unités utilisées. 189
Figure 3.12 Schéma d'un *process* d'*infrastructure* avec matériaux. . . . 194
Figure 3.14 Schéma d'aménagement de référence de TIMES-URBAN. 196
Figure 3.15 Carte de la métropole de Bordeaux (découpage IRIS) et des surfaces d'eau disponibles dans la BDTOPO. 198
Figure 3.17 Chaîne de post-traitement des résultats de TIMES-URBAN. 203
Figure 3.18 Principe général de la distribution spatiale. 206
Figure 3.19 Carte de deux IRIS choisis comme illustration de l'algorithme de URBAN-SPATIALIZER. 207
Figure 3.20 Carte des contraintes de la distance au tram. 208
Figure 3.21 Carte des contraintes de la distance au bus et au tram. . 208
Figure 3.22 Carte des contraintes du PLU. 209
Figure 3.23 Combinaison de la carte des écoles et de celle du PLU. . 209
Figure 3.24 Cartes des contraintes dans les cas des deux quartiers considérés. 210
Figure 3.25 Présence ou non de la forme urbaine dans l'année précédente (ici 2015) dans les deux quartiers. 211
Figure 3.26 Gradients de probabilité de lancement des nouveaux investissements dans l'archétype à partir des points sélectionnés. 211
Figure 3.27 Formes finales retenues pour le déploiement des nouveaux archétypes. 212
Figure 3.29 150 prédictions du modèle de régression linéaire testé sur les données utilisées (l'unité de l'axe des ordonnées arbitraire, les données étant normalisées). 216
Figure 3.30 100 prédictions du SVR (Support Vector Regression) testé sur les données utilisées (en °C). 216
Figure 3.31 Principe de fonctionnement d'un neurone en *machine-learning*. 217
Figure 3.32 Graphe d'un réseau de neurones complet. 218
Figure 3.33 Principe de base d'une couche de convolution qui utilise des morceaux de l'image ou des images d'entrée pour construire les images de sortie. 219
Figure 3.34 Structure du réseau de neurones déployé après des essais de plusieurs structures distinctes. 220

Figure 3.35 Schéma des couches successives retenues pour notre réseau. 220
Figure 3.36 Deux exemples de cartes parmi celles utilisées en données d'entrée pour l'entrainement du réseau de neurones. . . 222
Figure 3.37 Cartes des températures autour de la métropole de Bordeaux pour différentes journées en 2018 et 2019. 222
Figure 3.38 Évolutions de différents indicateurs de réussite de l'entrainement du réseau de neurones. 223
Figure 3.39 Transformation des sorties de TIMES-URBAN et de URBAN-SPATIALIZER en cartes de paramètres utilisables par le réseau de neurones URBAN-TEMPÊST. 224
Figure 3.40 Exemple de masque appliqué aux données de TIMES-URBAN projetée pour les compléter avec des informations sur les territoires extérieurs. 225
Figure 3.41 Données d'entrée du réseau de neurones dans des cas d'exemple en 2050. 226
Figure 3.42 Résumé de la méthodologie de modélisation. 227

Figure 4.1 Évolution de la démographie des principales intercommunalités girondines par rapport à la population de Bordeaux Métropole et aux moyennes départementale et nationale. 233
Figure 4.2 Comparaison des évolutions démographiques de quelques villes au sein de Bordeaux Métropole. 234
Figure 4.3 Investissements et différences dans l'évolution de l'utilisation des sols du scénario Base par rapport à l'année de référence. 236
Figure 4.4 Production de terrain bâti selon les archétypes. 237
Figure 4.5 Répartition des changements d'archétypes pour chacune des zones de TIMES-URBAN dans le scénario Base par rapport à l'année de référence (2014). 238
Figure 4.6 Répartition de la conversion de terrain *autre* pour chacune des zones de TIMES-URBAN dans le scénario Base en 2014 et 2050. 239
Figure 4.7 Production d'espaces naturels dans le scénario Base en 2050 par rapport à 2014. 239
Figure 4.8 Évolution de la surface d'espaces naturels par rapport à l'année de référence 2014 pour l'ensemble des 19 zones pour le scénario Base. 240
Figure 4.9 Investissements et différences dans l'évolution des bâtiments du scénario Base par rapport à l'année de référence. 241
Figure 4.10 Évolution et répartition géographique des emplois fournis par les archétypes de bâtiments. 242
Figure 4.11 Échanges d'emplois en valeurs absolues au sein de la métropole dans le scénario Base. 244
Figure 4.12 Répartition des archétypes de formes urbaines en 2050 dans le scénario Base. 246
Figure 4.13 Cartes de différences de deux paramètres caractéristiques des formes urbaines dans le scénario Base en 2050 par rapport à 2014. 247

Figure 4.14 Répartition des archétypes de bâtiments en 2050 dans le scénario Base. 247
Figure 4.15 Zoom de la carte des différences de répartition en 2050 par rapport à 2014 dans le scénario Base sur une portion de la métropole. 248
Figure 4.16 Répartition de la modification de hauteur des bâtiments en 2050 dans le scénario Base par rapport à 2014. . . . 249
Figure 4.17 Tendances d'évolution de la population : scénario central de l'INSEE, scénario fictif où la population double entre 2014 et 2050 et deux scénarios basés sur le principe derrière l'Appel à Projets Innovations « 50 000 logements ». 251
Figure 4.18 Différences dans l'évolution de l'utilisation des sols dans le scénario DP en km^2 chaque année. 254
Figure 4.19 Changements absolus et relatifs d'occupation des sols en cumulé dans le scénario DP par rapport au scénario de référence Base. 255
Figure 4.20 Production de terrain bâtissable selon les archétypes. . 255
Figure 4.21 Production d'espaces naturels, différences par rapport au scénario Base. 257
Figure 4.22 Évolution de la surface d'espaces naturels en 2050 pour l'ensemble des 19 zones dans le scénario DP par rapport à Base. 258
Figure 4.23 Surface recouverte par les bâtiments dans le scénario DP, en différence par rapport au scénario Base. 259
Figure 4.24 Répartition géographique des changements dans le scénario DP par rapport au scénario Base en 2050. 259
Figure 4.25 Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *formes urbaines*, le coefficient d'emprise au sol et la proportion d'espaces naturels sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans les scénarios Base et DP. 262
Figure 4.26 Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *formes urbaines*, le coefficient d'emprise au sol et la proportion d'espaces naturels sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans les scénarios Base et DP. 263
Figure 4.27 Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *bâtiments* et la hauteur moyenne sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans les scénarios Base et DP. 264
Figure 4.28 Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *bâtiments* et la hauteur moyenne sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans les scénarios Base et DP. 265
Figure 4.29 Différences dans l'évolution de l'utilisation des sols dans le scénario ZAN par rapport au scénario de référence Base. 271
Figure 4.30 Production d'espaces naturels, différence du scénario ZAN par rapport au scénario Base. 272
Figure 4.31 Répartition géographique de la production de surface bâtie dans le scénario ZAN en 2050 par rapport au scénario Base et à 2014. 273
Figure 4.32 Évolution de la surface d'espaces naturels par rapport à l'année de référence 2014 pour l'ensemble des 19 zones dans le scénario ZAN. 273

Figure 4.33 Production de terrain bâtissable selon les archétypes. . 274
Figure 4.34 Différences de localisation d'archétypes de *formes urbaines* entre 2014 et 2050 dans le cas du scénario ZAN. 275
Figure 4.35 Différences de localisation d'archétypes à l'ouest de la métropole entre 2014 et 2050 dans les scénarios Base et ZAN. 276
Figure 4.36 Différences de localisation d'archétypes au nord de la métropole entre 2014 et 2050 dans les scénarios Base et ZAN. 276
Figure 4.37 Carte de proximité aux arrêts de transport en commun. 281
Figure 4.38 Différences dans l'évolution de l'utilisation des sols dans les deux scénarios (BT et T) par rapport au scénario de référence Base. 283
Figure 4.39 Changements absolus et relatifs d'occupation des sols en cumulé dans les scénario BT et T par rapport au scénario de référence Base. 285
Figure 4.40 Productions totales de terrain bâtissable selon les archétypes sur les trois scénarios. 285
Figure 4.41 Différences des scénario BT et T par rapport au scénario Base. 286
Figure 4.42 Production d'espaces naturels, différences par rapport au scénario Base. 287
Figure 4.43 Évolution de la surface d'espaces naturels par rapport à l'année de référence 2014 pour l'ensemble des 19 zones dans les trois scénarios (Base, T, BT). 288
Figure 4.44 Surface recouverte par les bâtiments dans les scénario BT et T en différence par rapport au scénario Base. 289
Figure 4.45 Distribution géographique des modifications des archétypes de bâtiments dans les scénarios BT et T par rapport au scénario Base. 290
Figure 4.46 Évolution de la répartition de la population entre les différentes formes de logements des scénario BT et T par rapport au scénario de référence Base. 291
Figure 4.47 Investissements et différences dans l'évolution des bâtiments des scénarios BT et T par rapport au scénario Base. 292
Figure 4.48 Échanges d'emplois au sein de la métropole dans le scénario Base en valeurs absolues. 293
Figure 4.49 Différences de localisation des archétypes de *formes urbaines* entre 2014 et 2050 dans les scénario BT et T. . . . 295
Figure 4.50 Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *formes urbaines*, le coefficient d'emprise au sol et la proportion d'espaces naturels sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans les scénarios Base, BT et T. . . . 296
Figure 4.51 Second zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *formes urbaines*, le coefficient d'emprise au sol et la proportion d'espaces naturels sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans les scénarios Base, BT et T. 297

Figure 4.52 Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *bâtiments* et la hauteur moyenne sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans les scénarios Base, BT et T. 298
Figure 4.53 Comparaison entre les données de Météo France utilisées pour l'entrainement et le résultats de URBAN-TEMPÊST sur l'année de référence. 302
Figure 4.54 Cartes de résultats de l'application de URBAN-TEMPÊST sur la situation de Bordeaux Métropole dans le scénario de référence en 2050. 303
Figure 4.55 Cartes de résultats de l'application de URBAN-TEMPÊST sur la situation de Bordeaux Métropole dans le scénario DP en 2050. 304
Figure 4.56 Cartes de différences de la température en 2050 dans les scénarios de densification autour des axes de transport par rapport à 2014. 305
Figure 4.57 Cartes de différences de la température en 2050 dans les scénarios de densification autour des axes de transport par rapport au scénario de référence. 306
Figure 4.58 Cartes de différences de la température en 2050 dans le scénario « *Zéro artificialisation nette* » par rapport à 2014 et au scénario de référence. 307

Figure D.1 Variance expliquée par les différents axes de l'ACP pour l'utilisation des sols (en ratio de variance) 393
Figure D.2 Contributions principales des paramètres au premier vecteur propre (par valeur propre décroissante) 394
Figure D.3 Contributions principales des paramètres au deuxième vecteur propre (par valeur propre décroissante) 395
Figure D.4 Cartes des entropies d'occupation des sols selon les données de Copernicus 396
Figure D.5 Contributions principales des paramètres au troisième vecteur propre (par valeur propre décroissante) 397
Figure D.6 Variance expliquée par les différents axes de l'ACP pour les bâtiments (en ratio de variance) 397
Figure D.7 Contributions principales des paramètres au premier vecteur propre pour les bâtiments (par valeur propre décroissante) 398
Figure D.8 Contributions principales des paramètres au deuxième vecteur propre pour les bâtiments (par valeur propre décroissante) 399
Figure D.9 Contributions principales des paramètres au troisième vecteur propre pour les bâtiments (par valeur propre décroissante) 399

Figure E.1 Carte de répartition de l'archétype *Ville dense proche 1*. . . 402
Figure E.2 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Ville dense proche 1*. 403
Figure E.3 Carte de répartition de l'archétype *Banlieue / petites villes 1*. 404
Figure E.4 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Banlieue / petites villes 1*. 405
Figure E.5 Carte de répartition de l'archétype *Zone rurale 1*. 406

Figure E.6 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Zone rurale 1*. . 407
Figure E.7 Carte de répartition de l'archétype *Saint-Médard-en-Jalles*. 408
Figure E.8 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Saint-Médard-en-Jalles*. 409
Figure E.9 Carte de répartition de l'archétype *Centre historique*. . . . 411
Figure E.10 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Centre historique*. 411
Figure E.11 Carte de répartition de l'archétype *Ville dense proche 2*. . . 412
Figure E.12 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Ville dense proche 2*. 413
Figure E.13 Carte de répartition de l'archétype *Banlieue / petites villes 2*. 415
Figure E.14 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Banlieue / petites villes 2*. 415
Figure E.15 Carte de répartition de l'archétype *Zone d'activités 1*. . . . 416
Figure E.16 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Zone d'activités 1*. 417
Figure E.17 Carte de répartition de l'archétype *Zone d'activités 2*. . . . 418
Figure E.18 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Zone d'activités 2*. 419
Figure E.19 Carte de répartition de l'archétype *Ville dense proche 3*. . . 420
Figure E.20 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Ville dense proche 3*. 421

Figure F.1 Quelques distributions de paramètres caractéristiques des bâtiments. 424
Figure F.2 Distributions de la période de construction des bâtiments classés. 425
Figure F.3 Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Large bâtiment d'activité*. 426
Figure F.4 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Large bâtiment d'activité*. 427
Figure F.5 Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Zones moyennement denses*. 428
Figure F.6 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Zones moyennement denses*. 429
Figure F.7 Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Bâtiments de nouvelle banlieue périurbaine*. 431
Figure F.8 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Bâtiments de nouvelle banlieue périurbaine*. 431
Figure F.9 Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Zones d'activités avec bureau*. 433
Figure F.10 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Zones d'activités avec bureau*. 433
Figure F.11 Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Bâtiments forte densité*. 435
Figure F.12 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Bâtiments forte densité*. 435
Figure F.13 Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Bâtiments de banlieue proche*. 439
Figure F.14 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Bâtiments de banlieue proche*. 439
Figure F.15 Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *'ZA de Saint-Médard-en-Jalles'*. 441
Figure F.16 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *'ZA de Saint-Médard-en-Jalles'*. 441

Figure F.17 Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Logements de banlieue périurbaine*. 443
Figure F.18 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Logements de banlieue périurbaine*. 443
Figure F.19 Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Logements anciens de banlieue périurbaine*. 445
Figure F.20 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Logements anciens de banlieue périurbaine*. 445
Figure F.21 Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Bâtiments du quartier historique*. 447
Figure F.22 Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Bâtiments du quartier historique*. 447

Figure H.1 Exemple d'ajout de contrainte par `TFM_INS` sur l'activité d'un process. 455
Figure H.2 Différents cas d'application des contraintes utilisateurs en termes d'échelles spatiales et temporelles. 456
Figure H.3 Exemple d'ajout d'une *contrainte utilisateur* (ou `UC`) sur l'activité d'un process. 457

LISTE DES TABLEAUX

Table 1.1 Tableau de quelques caractéristiques des communes formant Bordeaux Métropole. 13

Table 2.1 Principaux archétypes de densités identifiés par Adam et Moulinié, 2005, dans leur étude de la densité dans la ville de Paris. 108
Table 2.2 Coefficients calculés par la technique Lasso pour l'estimation de la largeur de la route. 129
Table 2.3 Paramètres rassemblés et utilisés pour caractériser les formes urbaines 142
Table 2.4 Paramètres collectés et utilisés pour caractériser les bâtiments 143
Table 2.5 Tableau présentant les caractéristiques de l'archétype « *Banlieues et petites villes* ». 161
Table 2.6 Tableau présentant les caractéristiques de l'archétype « *Centre historique* ». 163
Table 2.7 Tableau présentant les caractéristiques de l'archétype « *Larges bâtiments d'activités* ». 168
Table 2.8 Tableau présentant les caractéristiques de l'archétype « *Bâtiments à forte densité* ». 170
Table 2.9 Associations entre les archétypes de bâtiments créées ici et les archétypes construits par le projet européen TABULA. 172

Table 3.1 Quelques caractéristiques des 19 zones utilisées pour le découpage de TIMES-URBAN. 178

Table 3.2 Demandes finales pour chaque zone du modèle TIMES-URBAN en 2014. 182
Table 3.3 Utilisation par les différents moyens de transport des infrastructures. 190
Table 3.4 Vitesses moyennes des moyens de locomotion. 191
Table 3.5 Valeurs de d_m et o_m d'après les résultats des enquêtes ménages-déplacements sur la métropole bordelaise. . . 192
Table 3.6 Valeurs finales de l'estimation de l'efficacité par mode de transport en fonction de l'infrastructure utilisée. 193
Table 3.7 Table des contraintes imposées au modèle. 197
Table 3.8 Table des coûts des archétypes de bâtiments. 200
Table 3.9 Résultats sur les données de test du réseau de neurones entraîné sur l'année 2014. 223

Table 4.1 Tableau de la projection de l'évolution de la population du scénario central de projection de l'INSEE (Omphale 2017) et *estimation* pour la population de Bordeaux Métropole à partir de ces données. 233
Table 4.2 Répartition de la population entre les différentes zones de TIMES-URBAN 234
Table 4.3 Répartition des investissements cumulés en nouveaux archétypes en 2050 dans le scénario de référence. . . . 237
Table 4.4 Tableau de l'évolution de la population dans le scénario de référence et dans notre scénario DP de doublement de la population. 252
Table 4.5 Répartition des productions de terrain *bâti* des nouveaux investissements en archétypes et autres procédés employées dans le scénario DP par rapport au scénario Base en 2050. 256
Table 4.6 Table de la proportion des aires naturelles par archétype. 269
Table 4.7 Contraintes appliquées sur les aires naturelles par zone de TIMES-URBAN, en 2014 et 2050. 270
Table 4.8 Table des coûts des archétypes de formes urbaines. . . . 270
Table 4.9 Aires accessibles aux transports en commun. 282
Table 4.10 Changements d'investissements par année dans chacun des deux scénario BT et T par rapport au scénario de référence Base. 284
Table 4.11 Investissements totaux dans chacune des zones en 2050 des archétypes *proches des axes* de transport dans les scénario BT et T. 287

Table E.1 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Ville dense proche 1* 402
Table E.2 Paramètres de l'archétype *Ville dense proche 1* 403
Table E.3 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Banlieue / petites villes 1* 404
Table E.4 Paramètres de l'archétype *Banlieue / petites villes 1* 405
Table E.5 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Zone rurale 1* 406
Table E.6 Paramètres de l'archétype *Zone rurale 1* 407
Table E.7 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Saint-Médard-en-Jalles* 408

Table E.8 Paramètres de l'archétype *Saint-Médard-en-Jalles* 409
Table E.9 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Centre historique* 410
Table E.10 Paramètres de l'archétype *Centre historique* 410
Table E.11 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Ville dense proche 2* 412
Table E.12 Paramètres de l'archétype *Ville dense proche 2* 413
Table E.13 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Banlieue / petites villes 2* 414
Table E.14 Paramètres de l'archétype *Banlieue / petites villes 2* 414
Table E.15 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Zone d'activités 1* 416
Table E.16 Paramètres de l'archétype *Zone d'activités 1* 417
Table E.17 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Zone d'activités 2* 418
Table E.18 Paramètres de l'archétype *Zone d'activités 2* 419
Table E.19 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Ville dense proche 3* 420
Table E.20 Paramètres de l'archétype *Ville dense proche 3* 421

Table F.1 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Large bâtiment d'activité* 426
Table F.2 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Zones moyennement denses* 428
Table F.3 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Bâtiments de nouvelle banlieue périurbaine* 430
Table F.4 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Zones d'activités avec bureau* 432
Table F.5 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Bâtiments forte densité* 434
Table F.6 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Bâtiments de banlieue proche* 438
Table F.7 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *ZA de Saint-Médard-en-Jalles* 440
Table F.8 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Logements de banlieue périurbaine* 442
Table F.9 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Logements anciens de banlieue périurbaine* 444
Table F.10 Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Bâtiments du quartier historique* 446

Table G.1 Stocks pour les véhicules particuliers, comparaison entre valeurs théoriques calculées à partir des stocks nationaux et valeurs obtenues pendant la calibration de TIMES-URBAN. 453

Introduction

L'humanité toute entière fait aujourd'hui face à une crise environnementale et sociale inédite. Les conséquences du progrès technique et scientifique ont permis l'émergence de modes de vie consuméristes dont l'empreinte globale est néfaste sur les écosystèmes. Quatre limites planétaires sur dix sont considérées comme franchies : notre impact sur la Terre aura des répercussions négatives sur plusieurs générations [Steffen et al. (2015)]. Il faudra probablement attendre plusieurs siècles avant que l'environnement ne retrouve sur la majeure partie de la surface de la planète un état stable et sûr dans lequel l'humain puisse vivre en harmonie : cela se fera au prix de transformations majeures.

Les villes ont un rôle majeur à jouer dans ces changements que notre société, occidentale en particulier, doit opérer : elles concentrent de façon croissante la population tout autour de la planète et continuent de s'étendre, même dans des pays européens comme la France [Guerois et Pumain (2017) et Molinier (1977)]. En outre, les villes ne sont pas simples spectatrices ou victimes d'une situation qui leur échapperait, elles ont un pouvoir économique, politique et social et doivent participer à l'effort sociétal sous peine de subir les conséquences de notre inaction [Barba-Sánchez et al. (2019), Bettencourt et al. (2007) et Dijkstra et al. (2016)]. Stébé et Marchal (2010) parlent ainsi de « troisième révolution urbaine », avec une ville qui est devenue à la fois « centre politique, administratif, religieux et surtout économique » [Stébé et Marchal (2010)].

L'urbanisme des villes, c'est-à-dire la façon dont elles se construisent et s'aménagent, impacte la vie de leurs habitants, leurs comportements et leur empreinte environnementale [Poruschi et Ambrey (2016) et Ross et Portugali (2018)], en se concrétisant dans la vie quotidienne, en particulier pour ce qui relève des questions d'inégalités sociales, de logements, de transport mais aussi d'accès à la culture, à l'emploi, etc. Autant de sources d'inégalités qui croissent depuis plusieurs décennies dans le monde [Chancel et al. (2018) et Stiglitz (2013)] et restent visibles en France, particulièrement au sein des grandes villes [Observatoire des inégalités (2019)]. Elles ont même poussé des chercheurs à préconiser l'emploi du terme de « ghetto » pour désigner la situation sociale de certains groupes en France [Rivière (2009)].

La pertinence et l'efficacité du mode de construction et de l'aménagement d'une ville se mesurent également sur le long-terme. Les choix réalisés ont des conséquences majeures sur l'organisation urbaine pendant des décennies, allant jusqu'à créer des irréversibilités territoriales [Kaufmann et Sager (2009)]. De nombreuses études scientifiques, souvent appuyées sur des modèles, se sont ainsi penchées sur le long terme de la végétation en ville [de Munck et al. (2017)],

de l'étalement urbain [Houet et al. (2016)], de l'impact de l'urbanisme sur les conséquences d'événements exceptionnels comme les inondations [Mustafa et al. (2018)] mais aussi sur les phénomènes récurrents comme les îlots de chaleur urbains [Houet et al. (2016)].

L'urbanisme a donc besoin de prendre en compte la portée de son action dans le futur, l'idée de trajectoire long-terme étant inhérente à la discipline. Pourtant, la question de l'avenir des villes a été assez peu étudiée du point de vue de l'urbaniste alors que plusieurs autres disciplines scientifiques accompagnent les décideurs pour la mise au point de politiques adéquates et efficaces : des travaux en économie [Clark (1951) et Viguié (2012b)], sciences sociales (avec notamment l'école de Chicago [Park (1915)] ou les travaux de Hägerstrand (1970) sur la notion de *budget temporel* [Hägerstrand (1970)]), géographie [Pumain (1997, 2010)], mais aussi météorologie (pour les consommations énergétiques ou les phénomènes climatiques locaux par exemple [Masson et al. (2013)]) ont entre autres questionné l'évolution des milieux urbains. Alors, pourquoi l'urbanisme est-il peu, en France en particulier, l'objet principal et le prisme de telles approches ? Il est possible que cette discipline ait été tardivement théorisée ou que la théorie y soit trop peu présente [Collectif Champ Libre (2018)], parce que les urbanistes restent concentrés sur les enjeux opérationnels et le jeu d'acteurs de la planification urbaine [Bourdin (2008b)], un système qui se complexifie et prend parfois de la distance avec le milieu urbain *réel* [Füzesséry (2010)]. Les urbanistes doivent en outre continuellement faire face à la réconciliation de plusieurs échelles spatiales (un territoire métropolitain et un quartier) et temporelles (le temps court de la décision politique et des réponses aux appels à projets, le temps long des chantiers et des durées de vie des formes urbaines conçues). Face à l'absence de mouvement décisif de la part des pouvoirs politiques, qui portent généralement la responsabilité de la décision des projets construits, il est compréhensible que l'urbanisme en tant que pratique particulière ait encore assez mal intégré les enjeux environnementaux dans ses approches [Dubois et al. (2016)].

Problématique

C'est là l'objet principal de cette thèse, la réconciliation des enjeux de long terme et de la vision urbaniste. Ainsi, nous proposons de concevoir et d'appliquer la modélisation prospective à l'urbanisme, et ainsi d'apporter un regard neuf sur l'évolution de l'occupation des sols sur plusieurs décennies au regard des enjeux environnementaux actuels. En nous inspirant des nombreuses applications de la prospective aux problématiques énergétiques, il nous paraît utile et pertinent de construire une méthodologie originale pour la prise en compte des spécificités territoriales dans un modèle long-terme. Enfin, une attention particulière a été portée à la communication et à la représentation de résultats de telles procédés, impliquant des besoins de réconciliations d'échelles spatiales.

De la sorte, nous avons joint l'idée que de nouveaux outils étaient nécessaires pour mieux servir l'intégration des enjeux climatiques et sociaux dans la démarche urbanistique [Alba et al. (2017)]. Pousin (2014) souligne d'ailleurs l'importance de la richesse de représentations utilisées par les acteurs travaillant autour de la ville [Pousin (2014)]. Aussi, l'approche proposée ici combine deux disciplines,

chacune ayant ses langages analytiques mais également visuels propres, et nous espérons contribuer par ce regard différent, à la fois du modélisateur, du prospectiviste et de l'urbaniste, à la diversité des analyses dont la ville fait l'objet.

Quelle ville voulons-nous pour le futur ? Quelle ville voulons-nous habiter ? Quelle ville rassemblera nos pulsions de vie sans marquer indélébilement l'environnement et la société par la création d'inégalités, de violences sociales et la pollution directe ou indirecte des ressources naturelles ?

Ces questions et tant d'autres se retrouvent dans le travail de l'urbaniste. Celui doit certes s'inscrire dans une démarche institutionnelle et administrative de développement des villes mais aussi dans cette démarche prospective d'interrogation des formes de villes qu'il nous faut construire aujourd'hui pour l'avenir. Nous avons donc voulu nous interroger sur l'évolution de l'aménagement du territoire sous différentes contraintes et plus particulièrement sur les services que peuvent rendre la modélisation prospective à l'urbanisme.

Cette thèse s'est faite en collaboration avec une agence d'urbanistes, l'Agence Nicolas Michelin et Associés, ou ANMA. Dans ce cadre, des échanges ont eu lieu afin de découvrir plus concrètement le fonctionnement de l'urbanisme en France et les attentes associées.

Choix du territoire étudié

Il serait présomptueux de chercher à proposer un modèle générique théorique : urbanisme comme modélisation prospective s'attachent à un territoire limité et à ses spécificités. Les deux disciplines commencent d'ailleurs généralement leur approche par réaliser un diagnostic territorial pour l'une, par un bilan énergétique ou environnemental pour l'autre. Or, l'urbanisme se déployant différemment, en théorie comme en pratique, dans les différents pays du monde [Watson (2009)], une application locale dans un pays particulier est d'autant plus judicieuse.

Dans cette optique, nous avons sélectionné une ville française sur laquelle déployer notre méthodologie, Bordeaux Métropole. Large intercommunalité, la ville est dynamique dans ses projets urbains [1], Bordeaux Métropole, notamment par l'action de son agence d'urbanisme publique, l'*a'urba*, et d'une société publique locale, *la Fabrique*, met régulièrement en place des phases de concertation et de réflexion sur son avenir [2]. La métropole bordelaise s'est également lancée en 2011 dans l'ouverture des données publiques avec une plateforme d'*open data*.

L'ensemble des développements réalisés dans le cadre de ce travail de thèse et présentés ici sera donc spécifiquement associé à Bordeaux Métropole. Pour autant, nous avons pris soin d'établir une méthodologie réplicable qui soit détachable de l'objet étudié. Ainsi, les sources de données sont à très large majorité natio-

1. Plusieurs appels à projets ambitieux ont vu le jour depuis une trentaine d'années et ont conduit à l'élaboration et à la construction de nombreux quartiers majeurs depuis (Ginko, Bacalan, Bordeaux Euratlantique…).

2. On peut par exemple citer l'appel à projets innovants « *50 000 logements* » initié au début des années 2010, puis l'opération *BM2050* en février 2018, opération qui visait à recueillir l'avis des habitants et à élaborer des visions originales de ce que pourrait être la métropole en 2050.

nales voire internationales, publiques ou tout du moins ouvertes aux entités de recherche : de la sorte, il est possible d'adapter les modèles décrits plus loin ou d'en créer une version pour une autre intercommunalité française.

Plan de la thèse

Dans un premier temps, nous élaborerons autour des éléments rapidement mentionnés dans cette introduction. Il s'agira, dans le chapitre 1, de dresser le contexte actuel et les enjeux qu'une ville doit considérer dans ses réflexions d'aménagement. Nous verrons particulièrement que plusieurs visions de villes *futures* coexistent pour guider l'urbanisme, et qu'elles invitent à développer une démarche prospective appuyée sur un exercice de modélisation afin d'interroger les impacts des décisions que nous prenons aujourd'hui.

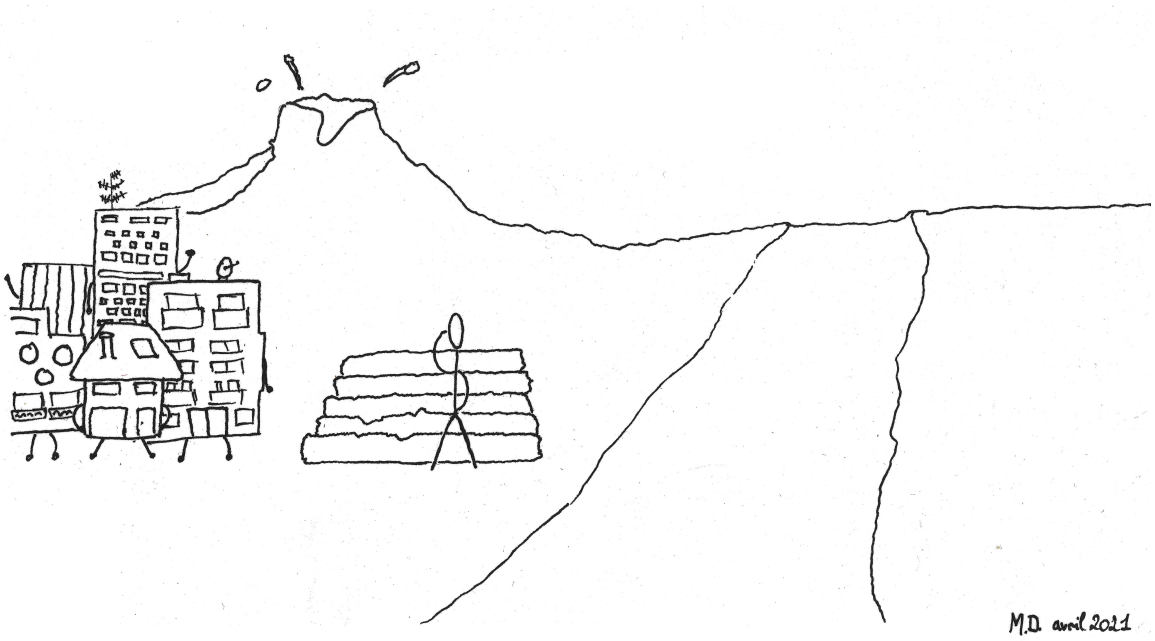
Pour construire une telle proposition, pour ancrer le modèle dans le territoire et ainsi respecter les principes urbanistiques et prospectivistes, une étude quantitative est décrite dans le chapitre 2. Celle-ci s'appuie sur l'essor des techniques autour des données ainsi que des progrès réalisés dans les systèmes d'information géographique pour élaborer des familles d'archétypes des principaux ensembles d'objets que manipule l'aménagement des villes.

À partir de ces éléments quantitatifs, nous proposons la construction d'un ensemble de modèles pour interroger l'évolution de l'occupation des sols et l'impact sur l'organisation de la métropole en 2050. Ces modèles, décrits dans le chapitre 3, sont au nombre de trois et sont appliqués séquentiellement : tout d'abord, un modèle d'optimisation bottom-up TIMES-URBAN, forme novatrice inspirée de la famille de modèles issus du générateur TIMES, qui effectue l'allocation optimale sous contraintes des ressources urbaines jusqu'en 2050 ; ensuite, un modèle de désagrégation spatiale, URBAN-SPATIALIZER ; enfin, un réseau de neurones spécifiquement construit pour estimer la température, URBAN-TEMPÊST.

Cette chaîne de modèles est appliquée à trois scénarios prospectifs dans le chapitre 4. Les résultats de ceux-ci sont comparés à une trajectoire de référence et sont mis en relation avec les objectifs de la méthodologie décrite dans ce document. Les conclusions communes aux trajectoires déterminées par l'approche déployée ici nous donnent pour finir l'occasion de proposer quelques recommandations pour l'aménagement urbain.

Chapitre 1

Les villes face à leurs futurs



Où l'on dresse un portrait des villes aujourd'hui et demain...

Il peut paraître étrange de tenter de définir un objet aussi général, répandu, commun, voire banal en ce premier quart de XXI^{ème} siècle. La ville a-t-elle réellement besoin de voir ses multiples réalités résumées par des mots ? La ville peut certes être vue comme « un milieu géographique et social formé par une réunion importante de constructions abritant des habitants qui travaillent, pour la plupart, à l'intérieur de l'agglomération [1]. » Cette définition ne doit cependant pas gommer la richesse de chacun des concepts qu'elle évoque. Les villes sont habitées par beaucoup d'humains et dans des formes si variées que toute tentative d'ignorance de cette diversité dans une définition n'aurait pour effet que de l'appauvrir. Nous faisons donc le pari ici de ne pas définir strictement la ville mais plutôt de voir comment elle se déploie dans la réalité, dans le monde, en France, et encore plus spécifiquement dans la métropole bordelaise, terrain d'application choisi pour ce travail de recherche. Les villes ne sont pas de simples objets techniques dont la fabrication et l'utilisation peuvent être décidées en fonction d'une efficacité ou d'une empreinte carbone : elles sont le lieu de vie d'une part croissante de l'humanité. De ce fait, elles voient naître nombre de nos problèmes mais sont aussi sources d'une grande diversité de solutions proposées.

Pour espérer accompagner l'urbanisme et l'aménagement, nous avons besoin de mieux comprendre la façon dont les villes sont construites, dont elles se projettent dans le temps et l'espace, sur leur territoire, autour d'elles et dans leur propre avenir. L'urbanisme est en pleine évolution et est à la recherche de nouveaux outils et de nouvelles synergies pour faire face aux enjeux actuels comme la crise environnementale. La modélisation, par l'utilisation d'outils informatiques et la mise à contribution de données quantitatives, a donc une utilité réelle pour la compréhension et l'étude de l'évolution des villes. Elle peut enrichir les réflexions urbaines face à ces problématiques environnementales, sociales et économiques.

Ce chapitre propose d'éclairer ces enjeux par un rapide panorama des villes d'aujourd'hui dans la section I. Puis nous parcourrons les principaux défis auxquels doit faire face une métropole française dans la section II. Cela nous mènera à étudier dans la section III quelles sont les propositions émergentes de *villes futures* et ainsi motiver le besoin d'une approche prospective des trajectoires urbaines. Dans la section IV, nous reviendrons sur le cadre de l'aménagement en France, dans lequel notre démarche doit s'insérer, et dont le fonctionnement relativement complexe voit lui aussi des changements importants advenir. La section V présentera la façon dont, dans ce contexte, la modélisation apporte à l'approche prospective un moyen d'éclairage de l'évolution future des villes, nous conduisant à élaborer notre problématique en section VI.

I. Les villes aujourd'hui

Il convient tout d'abord de placer « les villes » dans leur contexte global : celui mondial tout d'abord, pour souligner leur importance démographique ; celui français ensuite, avec ses spécificités institutionnelles et son organisation particulière ; et celui bordelais enfin, pour présenter dès maintenant notre objet

1. D'après *Le Robert*, accessible sur https://dictionnaire.lerobert.com/ (visité le 3 septembre 2020).

d'étude.

I.1. Dans le monde

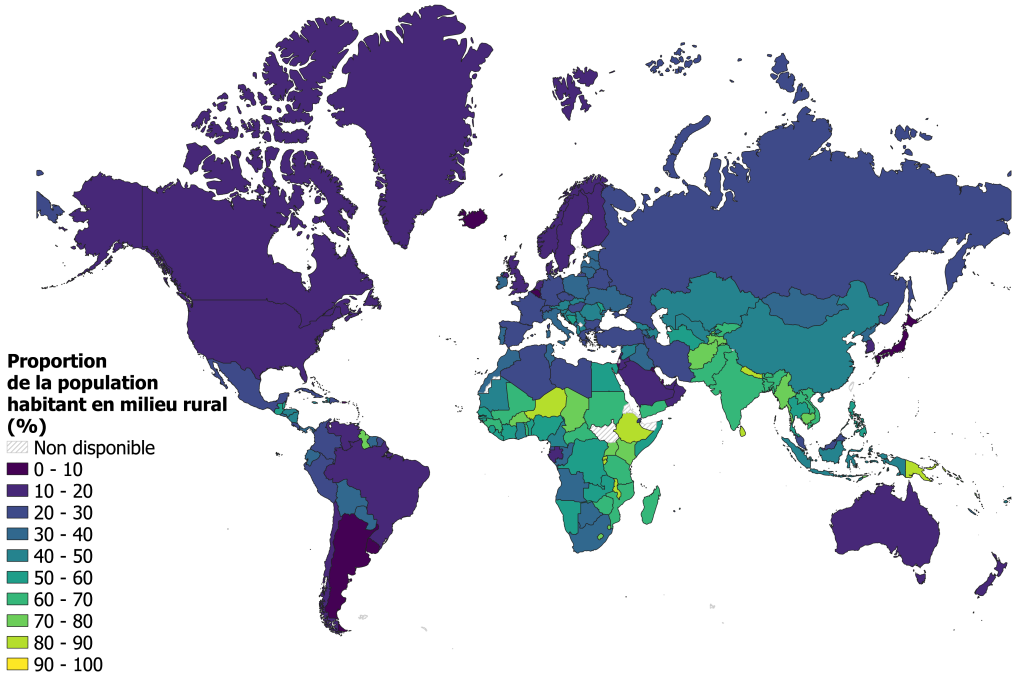


FIGURE 1.1 – Carte de la proportion de la population habitant en milieu rural dans le monde en 2014 (d'après des données de l'ONU et de la Banque mondiale 2020).

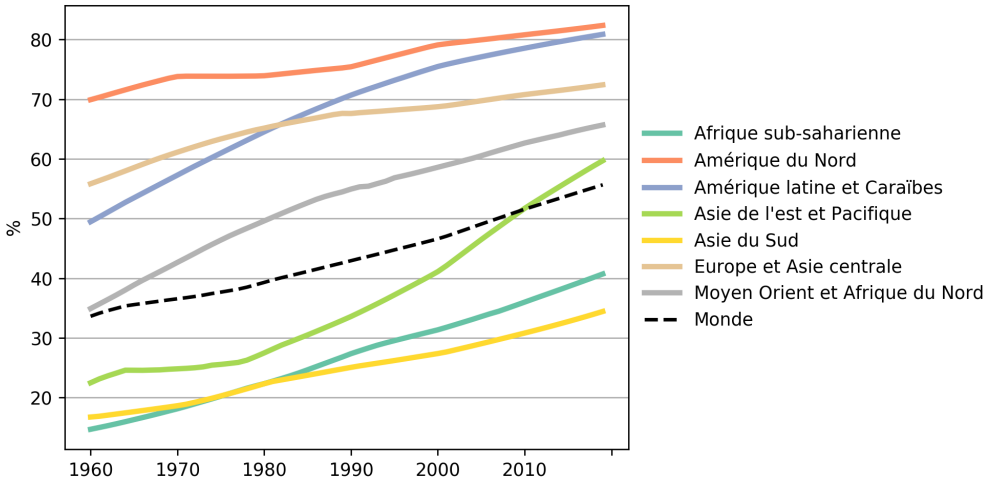


FIGURE 1.2 – Évolution de la proportion de la population dans le monde habitant en milieu urbain (d'après des données de l'ONU et de la Banque mondiale 2018).

Les villes concentrent aujourd'hui une part majoritaire de la population mondiale (environ 55 %). En étudiant les proportions de personnes habitant en milieu rural ou urbain dans le monde (cf. carte 1.1), on voit très clairement une disparité entre les pays occidentaux d'une part, avec moins de 40 % de population rurale, et les pays asiatiques et africains d'autre part, avec des valeurs variant plutôt entre 50 et 90 %. La population est aujourd'hui très largement concentrée dans les villes, notamment grâce à l'amélioration des techniques agricoles. La figure 1.2 souligne

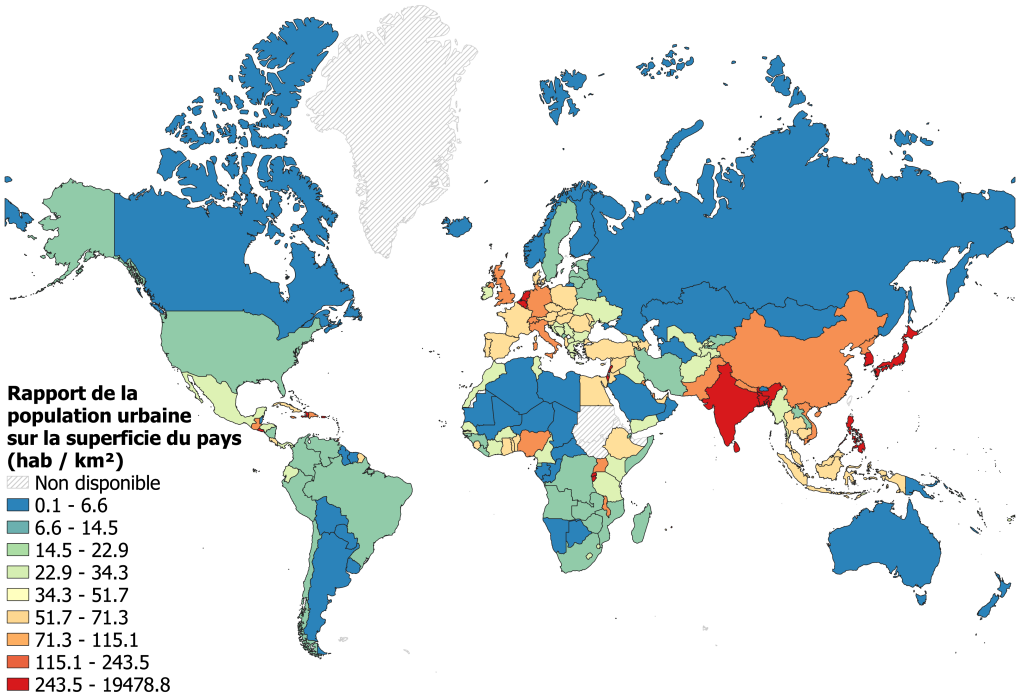
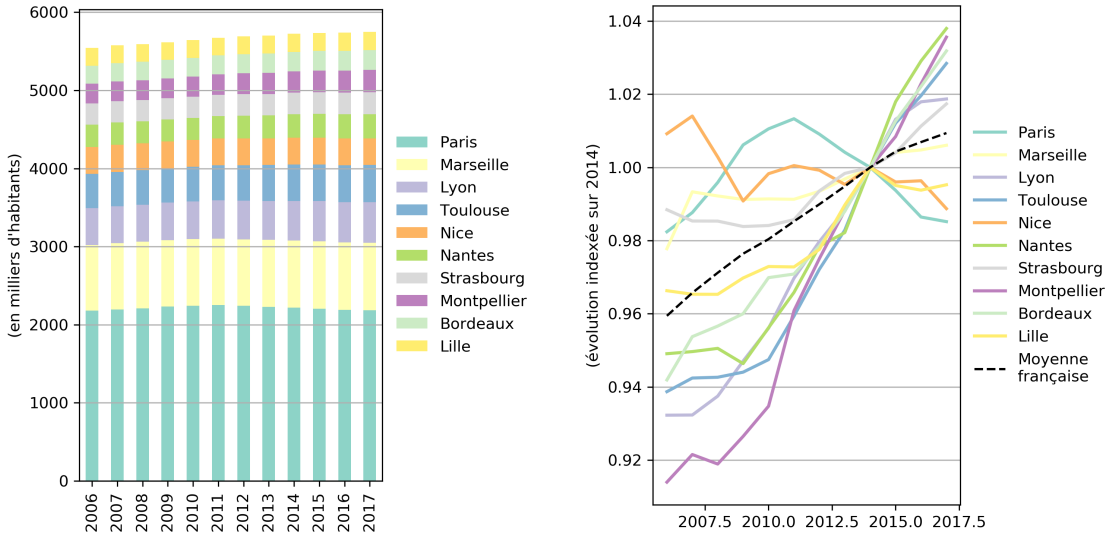


FIGURE 1.3 – Carte du rapport entre population urbaine et superficie du pays (d'après des données de l'ONU et de la Banque mondiale 2018) : cette figure rend compte de la densité des villes du pays de façon indirecte via cet indicateur original. Attention, l'échelle n'est pas régulière mais a été choisie pour plus de lisibilité dans les regroupements de pays (échelle équi-répartie).

les tendances de répartition des humains entre monde urbain et monde rural selon les continents. Le continent américain concentre ainsi 80 % de sa population dans les villes alors que le continent européen est plutôt autour de 72 % et l'Asie est autour de 47.5 %. Cette dernière montre toutefois une forte augmentation de cette concentration évaluée à environ 28 % en soixante ans. Cette croissance semble se poursuivre sur l'ensemble des continents après s'être particulièrement accélérée depuis vingt ans dans le continent asiatique.

La densité est difficile à évaluer à l'échelle d'un pays et ne sera que peu représentative de la situation réelle dans les villes. Les données des tailles de villes sont assez peu accessibles pour l'ensemble des pays du monde. Néanmoins, la carte 1.3 illustre l'utilisation de la ville pour le logement de la population : les États-Unis ont une population assez diffuse là où les pays européens montrent des densités plus fortes, tout comme les pays de l'Asie du Sud et de l'Asie de l'Est. Les pays africains sont moins densément peuplés à l'exception de quelques uns d'entre eux, dont le Nigeria par exemple.

En raison de cette concentration importante de population en leur sein, les villes sont plus susceptibles que les autres régions d'être victimes de toute crise qui toucherait un pays ou le monde [PEYRACHE-GADEAU et PECQUEUR (2011)] : la densité de population rend les marges de manœuvre plus faibles puisque l'ensemble des réseaux, des flux d'importations, des infrastructures sont généralement optimisés voire saturés et ne peuvent faire face à un changement drastique soudain.



(A) Répartition absolue de la population (en nombre d'habitants).

(B) Évolution relative de la population par rapport à 2014.

FIGURE 1.4 – Évolution et répartition de la population dans les dix plus grandes villes françaises depuis 2006 (d'après des données de l'INSEE)

I.2. En France

Quelle est la situation en France ? Tout d'abord, on peut regarder l'évolution de la population des dix plus grandes villes qui sont, en 2014, Paris, Marseille, Lyon, Toulouse, Nice, Nantes, Strasbourg, Montpellier, Bordeaux et Lille par ordre démographique décroissant (voir figure 1.4a). Les villes de Montpellier, Lyon, Toulouse, Nantes et Bordeaux ont connu les croissances les plus importantes comme le souligne par le graphique 1.4b. Les grandes villes françaises sont globalement en expansion, à l'exception peut-être de Paris et de Nice.

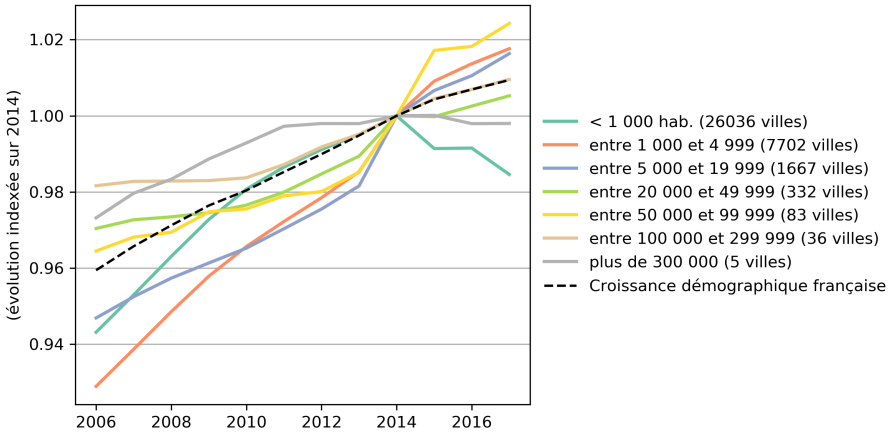


FIGURE 1.5 – Évolution de la population des villes françaises regroupées selon leur taille (d'après des données de l'INSEE).

L'évolution générale des villes est présentée dans la figure 1.5 selon différentes catégories de tailles de villes. Les seules catégories à ne pas évoluer sont les villes de plus de 300 000 habitants et celles de moins de 1 000 habitants. Toutes deux ont connu une hausse jusqu'en 2014 et diminuent en taille depuis. Quand on

regarde par rapport à la croissance démographique française, ce sont plutôt les petites villes (entre 1 000 et 20 000 habitants) et les villes moyennes (entre 50 000 et 100 000 habitants) qui sont les plus *dynamiques*. Les grandes villes (entre 100 000 et 300 000 habitants) attirent tandis que les métropoles (plus de 300 000 habitants) sont moins recherchées.

En France, les villes sont organisées en intercommunalités depuis maintenant plusieurs décennies. La loi du 27 janvier 2014 de « modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles », aussi appelée loi *MAPTAM*, est un des jalons principaux dans l'organisation des villes en intercommunalités. Plusieurs métropoles avaient été créées au fur et à mesure des années et la répartition des compétences entre l'État, les régions et ces EPCI [2] n'était pas claire. La loi *MAPTAM* a ainsi renforcé les responsabilités des communes et intercommunalités, sur la mobilité locale, les services publics de proximité, l'aménagement et le développement économique local. Elle introduit également une rupture par rapport aux logiques de constitution des intercommunalités qui se formaient jusque-là plutôt par décision des communes. La loi *MAPTAM* impose ainsi la création d'un certain nombre de métropoles dites de « droit commun » (Bordeaux, Brest, Grenoble, Lille, Montpellier, Nantes, Rennes, Rouen, Strasbourg et Toulouse), de même que celles d'Aix-Marseille-Provence, de Lyon, du Grand Paris, toutes trois avec un statut particulier [Gerbeau (2014)]. La loi du 7 août 2015, portant « nouvelle organisation territoriale de la République », ou loi *NOTRe*, est le dernier jalon récent d'importance sur l'organisation du territoire français. Elle change notamment les règles de création d'une métropole mais n'a pas d'impact majeur à l'échelle des intercommunalités de taille importante (c'est-à-dire supérieures à 15 000 habitants) [DILA (2018)].

Pourquoi ces explications arides sur l'organisation institutionnelle des villes en France ? Il est important d'étudier quelles sont les compétences des communes avant de tenter un exercice de prospective sur la ville : selon l'échelle considérée, les acteurs publics n'ont pas les mêmes rôles et prérogatives. Ainsi, aujourd'hui, les communes sont responsables de l'« *urbanisme, [du] logement, [de l']environnement, [de la] gestion des écoles préélémentaires et élémentaires* », ainsi que des axes partagés avec les autres niveaux (départements et régions), « *sport, tourisme, culture, promotion des langues régionales, éducation populaire* » [Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales (2020)].

Les villes ont toujours eu à lutter contre des problèmes de santé publique notamment liés à la concentration importante d'hommes et de femmes [Stébé et Marchal (2010)] mais aussi à la proximité des industries et d'autres sources de pollution [Barles (2010) et Frioux (2010)]. De nombreuses réformes au cours des siècles ont eu également ces enjeux à l'esprit [3] [Wolfe (2019)]. On peut remarquer que la question environnementale intervient également dans les compétences des villes et c'est aujourd'hui le transport qui cristallise une part importante des efforts des municipalités françaises. La pollution de l'air en ville est en effet en large partie due aux rejets des véhicules thermiques à carburants fossiles [Degraeuwe

2. EPCI : établissement public de coopération intercommunale.

3. On pourra par exemple penser aux grandes réformes haussmaniennes du Second Empire qui tentent de rationaliser, notamment par les travaux de Nadar sur les égoûts, l'organisation urbaine d'une ville qui se trouve dans de mauvaises conditions sanitaires [Frank et Engelke (2001) et Gandy (1999)].

et al. (2017)]. Elle constitue un véritable risque sanitaire pour les habitants des principales agglomérations [Mandard (2019)]. Les élections municipales de 2020 ont montré que la prise de conscience en France sur ces questions devenait importante avec la victoire inattendue de listes dirigées par le parti *Europe Écologie Les Verts* (EELV) comme à Lyon, Marseille et Bordeaux. Ceci augure peut-être l'avénement de mesures plus ambitieuses sur le sujet dans les prochaines années [Gougou et Persico (2020) et Jacque (2020)].

I.3. Bordeaux Métropole, notre territoire d'application

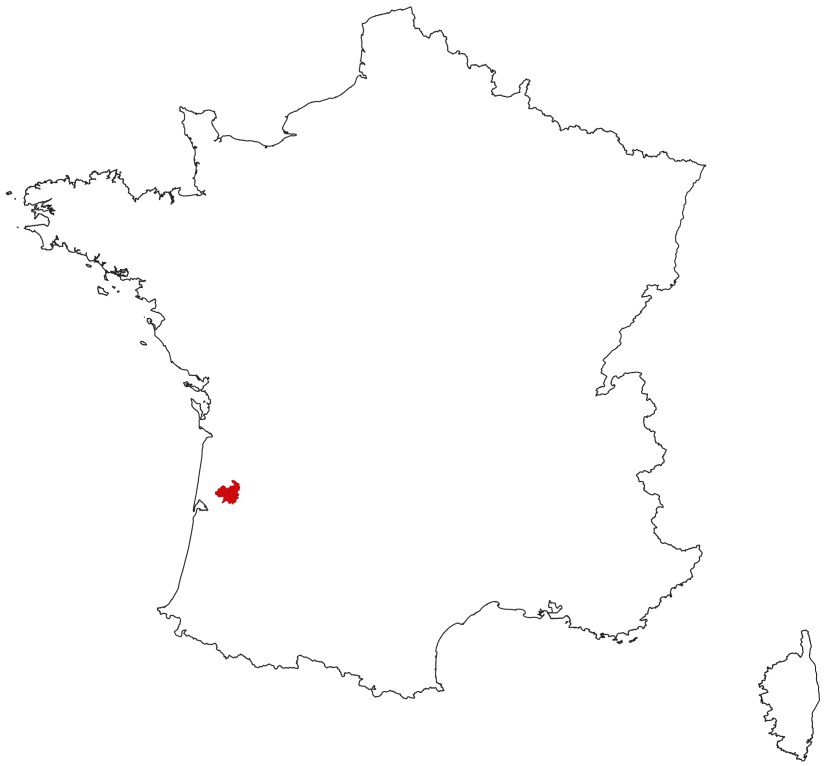


Figure 1.6 – Localisation de la métropole de Bordeaux sur le territoire français et comparaison des deux échelles.

Nous avons choisi, au cours du développement de l'approche présentée dans cette thèse, de nous concentrer sur la métropole de Bordeaux pour les raisons mentionnées ci-après [4].

La métropole de Bordeaux est située dans le sud ouest de la France (voir carte 1.6), dans le département de la Gironde au sein de la région Nouvelle-Aquitaine [5]. La ville est surtout connue pour ses vignobles, de renommée mondiale, mais a également été un port important pour le commerce français entre le XII^{ème} et le XIX^{ème} siècle (avec une apogée économique notamment aux XVII^{ème} et XVIII^{ème}

4. Il nous semble toutefois pertinent de noter qu'un cas d'application est de toute façon nécessaire dans toute approche similaire, que ce soit dans les domaines de l'urbanisme ou de la modélisation prospective comme nous aurons l'occasion de le développer par la suite (voir section IV et section V).

5. Elle se trouvait en Aquitaine avant la fusion au 1er janvier 2016 de cette dernière avec les régions Limousin et Poitou-Charentes pour former la Nouvelle-Aquitaine.

siècles, de par sa participation aux traites négrières) [Reclus (1881) et Wikipédia (2020c, 2020d)].

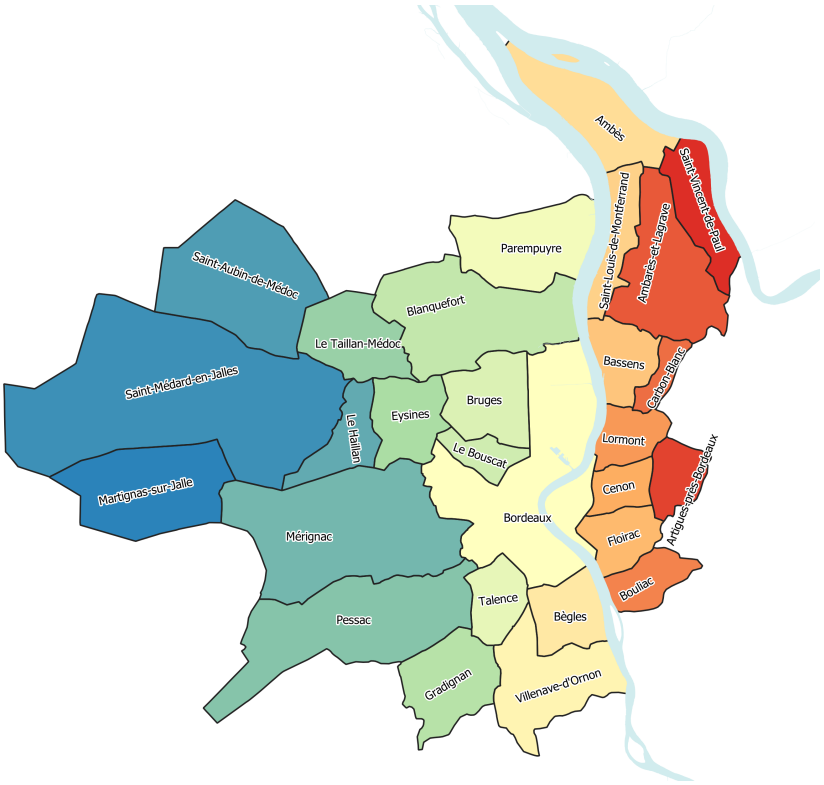


Figure 1.7 – Carte des 28 communes formant la métropole de Bordeaux.

Elle rassemble depuis la loi MAPTAM 28 communes (visibles sur la figure 1.7) et a ainsi remplacé la CUB ou Communauté Urbaine de Bordeaux le 1er janvier 2015. Aucune modification de périmètre n'est intervenue lors de ce changement, la dernière commune ayant rejoint la CUB ou Bordeaux Métropole étant Martignas-sur-Jalle en 2013 [Wikipédia (2020d)]. La métropole est séparée en deux du nord au sud par la Garonne entre les communes de la rive droite à l'est (Ambès, Saint-Louis-de-Montferrand, Bassens, etc.) et celles de la rive gauche à l'ouest (Parempuyre, Blanquefort, Bruges, Bègles, etc.).

Le tableau 1.1 dresse la liste des communes de la métropole, leur population en 2014 ainsi que leur superficie d'après les découpages administratifs. On peut remarquer que l'ouest de la métropole présente les villes les plus étendues (Saint-Médard-en-Jalles, Bordeaux, Mérignac, Pessac, Saint-Aubin-de-Médoc, Blanquefort, Martignas-sur-Jalle).

La métropole bordelaise avait lancé une concertation au début des années 2010, en partie liée à la croissance démographique que pouvait engendrer la création de ligne grande vitesse de train la reliant à Paris [Hiscock (2017) et Lozano (2017)]. L'idée était d'étudier la faisabilité du doublement de la production annuelle de logements pour construire 50 000 nouveaux logements d'ici à 2030, si possible concentrés autour du transport collectif [Hirschberger et al. (2018) et Uri et al. (2013)]. De grandes agences d'architectes et d'urbanistes [6] ont été sélectionnées pour produire une étude de cette problématique, chacune avec son

6. Les agences ayant participé à cet Appel à Projets Innovants (ou API) sont les suivantes : OMA, Lacaton Vassal, A.Chemetoff et associés, 51N4E et AUC.

Nom commun	Population (hab)	Aire (ha)	Densité (hab/km²)
Bordeaux	246 586	4 969	4 962
Mérignac	69 301	4 798	1 444
Pessac	61 514	3 863	1 592
Talence	41 182	836	4 926
Villenave-d'Ornon	31 027	2 122	1 462
Saint-Médard-en-Jalles	29 779	8 498	350
Bègles	26 437	1 091	2 423
Gradignan	24 841	1 577	1 575
Cenon	24 039	569	4 225
Le Bouscat	23 439	528	4 439
Eysines	21 813	1 199	1 819
Lormont	21 128	780	2 709
Bruges	17 567	1 418	1 239
Floirac	16 756	853	1 964
Blanquefort	15 463	3 412	453
Ambarès-et-Lagrave	15 315	2 482	617
Le Haillan	10 791	929	1 162
Le Taillan-Médoc	9 779	1 517	645
Artigues-près-Bordeaux	8 097	727	1 114
Parempuyre	8 024	2 189	367
Carbon-Blanc	7 352	394	1 866
Martignas-sur-Jalle	7 332	2 648	277
Bassens	6 946	1 028	676
Saint-Aubin-de-Médoc	6 704	3 481	193
Bouliac	3 335	778	429
Ambès	3 190	2 475	129
Saint-Louis-de-Montferrand	2 175	1 128	193
Saint-Vincent-de-Paul	1 021	1 388	74

TABLEAU 1.1 – Tableau de quelques caractéristiques des communes formant Bordeaux Métropole.

regard particulier, et proposer des solutions [Uri et al. (2013)]. Cette première étape de « dialogue compétitif » a ensuite été suivie par une sélection de sites sur la métropole pour la définition de projets plus précis. Depuis, les réticences du public vis-à-vis d'un tel projet et les questions environnementales ont conduit les autorités à redéfinir le nom de l'opération de « *50 000 logements autour des axes de transports collectifs* » en « *Habiter, s'épanouir – 50 000 logements accessibles par nature.* » Près de 1 000 logements sont déjà sortis de terre et plusieurs milliers sont en projet mais l'initiative a globalement pris du retard [Coletto (2019) et Déjean (2019)]. Elle témoigne cependant de la dynamique que cherche à insuffler la métropole au niveau de l'aménagement du territoire et de la production de logements, en particulier dans un contexte d'un foncier très peu maîtrisé et de fonds publics en constante baisse [Hirschberger et al. (2018)].

II. Les villes, actrices d'une crise mondiale

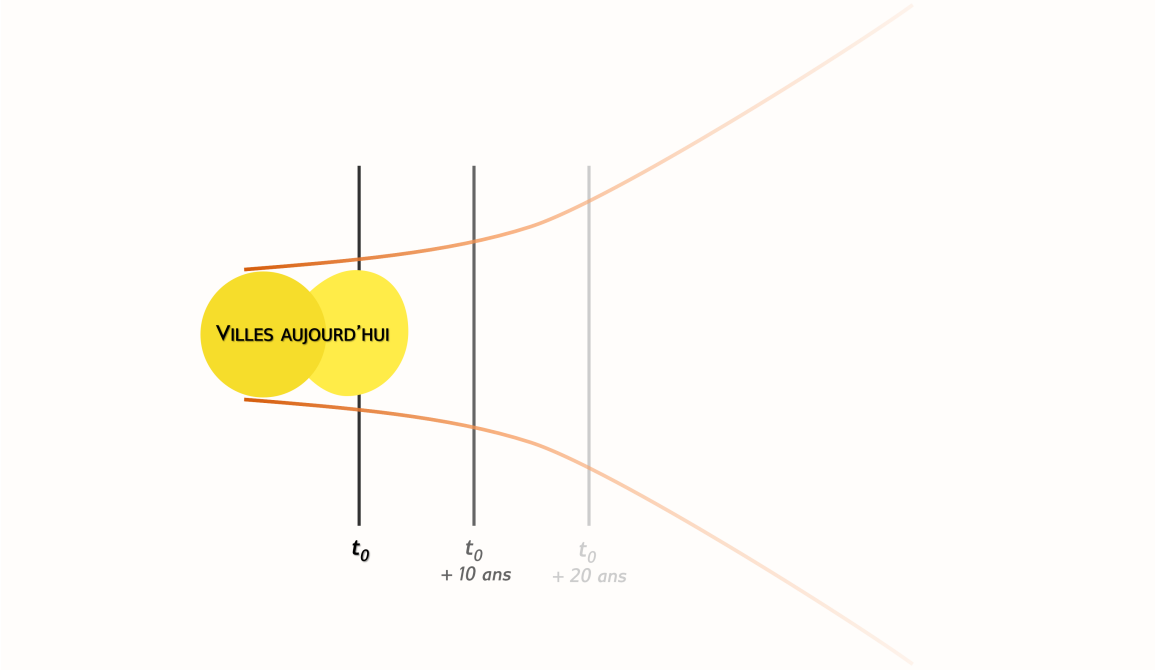


Figure 1.8 – Résumé du contexte : nous avons présenté la situation des villes aujourd'hui dans le monde et en France (ce graphique sera mis à jour au début de chaque section de ce chapitre).

Les sections précédentes ont donné un aperçu schématique de la place de la ville aujourd'hui dans le monde, en France et à Bordeaux.

Les villes croissent, en France en particulier, la métropole de Bordeaux n'y faisant pas exception : cette croissance peut mettre en danger, entre autres, la santé physique et mentale des habitants [7] [Corburn (2007) et Frumkin (2002)] ou encore la justice sociale [Soja (2010b)]. Cette croissance urbaine rapide peut être l'occasion de proposer une transition alternative, alors que nos sociétés sont fortement consommatrices de ressources naturelles et d'énergie [SOM (2019)] et de faire face plus efficacement à ces enjeux sanitaires et sociaux. En prenant

7. Ce lien est établi depuis le XIX^{ème} siècle au moins, voire plus tôt. Il a fait l'objet de nombreuses études et recherches en particulier en Europe et aux États-Unis [Krieger et Higgins (2002)].

le temps dès aujourd'hui d'évaluer l'impact de nos choix d'aménagement, de construction, d'organisation des milieux urbains, il nous serait possible d'éviter de reproduire des erreurs passées, par exemple quant à la place de la voiture dans la conception de nos villes [Orsenna et Gilsoul (2018) et Tannier et al. (2016a)]. L'époque où les conséquences du choix de l'automobile n'étaient pas connues et où d'autres priorités étaient mises en avant, est révolue. Il ne s'agit pas d'abandonner le modèle des villes [8] mais plutôt de constater que les multiples services qu'elles rendent, en concentrant la culture, l'éducation, les emplois, ont aussi un revers de médaille. Une telle intensité humaine et les modes de vie qu'offrent ces formes ont une empreinte majeure [O'Meara (1999)]. Cette idée que les villes sont des lieux peu accueillants et déshumanisants n'est pas nouvelle et apparaît dans la littérature de l'ère industrielle par exemple, Dickens décrivant ainsi des milieux mécanisés ne laissant pas ou plus de place pour l'humain [O'Meara (1999)].

Il est maintenant intéressant de se pencher sur les enjeux qui attendent les milieux urbains dans les décennies à venir, en nous concentrant particulièrement sur l'urgence environnementale. La crise climatique, par la menace qu'elle fait peser sur nos existences individuelles mais aussi sur notre société toute entière dessine sinon les tendances du moins les contraintes qui s'appliquent aux nouvelles pratiques de conception. Nous allons voir comment ces contraintes se déclinent au niveau urbain et de quels leviers disposent les villes pour y faire face (section II.1). Nous verrons ensuite que ces nécessaires changements de méthodes et d'objectifs doivent également intégrer des questions de justice sociale. Celles-ci sont intrinsèques à la crise environnementale et à ses conséquences, mais sont également liées aux caractéristiques spatiales des villes ou même plus largement à l'organisation de notre société (section II.2).

II.1. La crise environnementale, raison urgente d'évolution

La ville, comme toute construction humaine, doit se projeter dans le futur et faire face aux conséquences de son développement ainsi qu'aux conditions structurelles et conjoncturelles de l'environnement dans lequel elle s'inscrit. Or, les villes sont tout à fait concernées par la crise environnementale qui bouleverse ce début de XXI^{ème} siècle, comme nous allons le voir ci-dessous.

II.1.a. Une crise étudiée à l'échelle mondiale

La crise environnementale n'est plus à présenter : les très nombreux rapports du GIEC [9] ont établi l'existence d'un consensus scientifique sur le fait que notre planète subit des dérèglements. Ces derniers s'observent dans nombre de cycles de

8. Comment cela pourrait-il se faire sans un effondrement comparable à la catastrophe imaginée par Barjavel (2007) dans l'ouvrage de fiction dystopique *Ravage*? Le mouvement des collapsologues s'interroge notamment sur les conséquences d'un effondrement généralisé de la société sur les villes et pense que celles-ci ne sont pas des lieux soutenables d'accueil des humains [Mao (2019)]. Sans aller jusqu'à prôner un abandon des villes, les techniques d'aménagement devraient être drastiquement modifiées pour que les villes soient plus résilientes [Favriau (2019)].

9. *GIEC* ou Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, ou encore *IPCC* en anglais pour *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

régulation liés aux activités anthropiques, dans la disparation d'une part importante de la biodiversité, dans la pollution ou l'extraction trop rapide de ressources qui mettent en péril la survie des espèces vivantes et de l'espèce humaine [IPCC et Stocker (2014) et P.R. Shukla et al. (2019)].

Le changement climatique impacte déjà les milieux urbains. Il risque de mettre en péril les communes mal préparées au cours des prochaines décennies : c'est un des enjeux principaux qui concernent les villes [10], enjeux pour lesquels il est nécessaire dès aujourd'hui d'adapter notre façon de construire et d'habiter, les infrastructures et les bâtiments restant généralement en place plusieurs décennies [11].

Population (Millions)	GHG Emissions (M tCO_2e)	GDP (billion $ PPP)
1. China: 1,192	1. USA: 7,107	1. USA: 14,204
2. India: 916	2. China: 4,058	**2. 50 Largest Cities: 9,564**
3. 50 Largest Cities: 500	**3. 50 Largest Cities: 2,606**	**3. C40 Cities: 8,781**
4. C40 Cities: 393	**4. C40 Cities: 2,364**	4. China: 7,903
5. USA: 301	5. Russian Federation: 2,193	5. Japan: 4,354
6. Indonesia: 190	6. Japan: 1,374	**6. Top 10 GHG Cities: 4,313**
7. Brazil: 159	**7. Top 10 GHG Cities: 1,367**	7. India: 3,388
8. Russian Federation: 142	8. India: 1,214	8. Germany: 2,925
9. Top 10 GHG Cities: 136	9. Germany: 956	9. Russian Federation: 2,288
10. Japan: 128	10. Canada: 747	10. United Kingdom: 2,176

Source: See Annex D. Data for the urban agglomeration associated with each C40 city is used in calculations to maintain consistency with the 50 largest cities, 2005.

Figure 1.9 – Classement des groupes des 10 villes les plus émettrices de gaz à effet de serre, des villes participant au mouvement C40 – rassemblement de villes pour la coopération dans la lutte contre la crise environnementale – et des 50 villes les plus grandes du monde, parmi les pays les plus peuplés, les plus riches (au sens du PIB) et les plus émetteurs de gaz à effet de serre (source : Banque Mondiale 2012).

Les villes peuvent être par leur pouvoir d'action et leur poids démographique des acteurs primordiaux dans la lutte contre le changement climatique [Peyrache-Gadeau et Pecqueur (2011) et REN21 (2019)]. Et ce d'autant plus qu'elles seront fortement touchées par les conséquences potentielles de ce dernier. Debra Roberts, vice-présidente du GIEC, souligne ainsi que, « dans les prochaines 20

10. Quand on regarde le dépassement des limites planétaires tel que proposé par Rockström et al. (2009) pour « *un espace sûr de vie de l'humanité* » (*a safe operating space for humanity*), l'érosion de la biodiversité et la perturbation du cycle de l'azote sont plus critiques que le changement climatique, qui est évalué par la concentration de CO_2 dans l'atmosphère [Rockström et al. (2009)]. Parce que la ville s'approvisionne en nourriture, celle-ci est concernée par ces autres crises planétaires que l'on choisit ici de toutes regrouper sous l'appellation *crise environnementale* [Banque mondiale (2010a)].

11. La Banque mondiale (2010a) expose ainsi que les « villes sont particulièrement vulnérables par le fait qu'elles sont immobiles » (« *cities are particularly vulnerable in that they are immobile* ») et qu'elles peuvent avoir tendance à rester bloquées par les infrastructures dans lesquelles elles ont investi qui structurent *de facto* leur territoire [Banque mondiale (2010a)]. Kaufmann et Sager (2009) parlent quant à eux d'irréversibilité dans la forme du territoire urbain causée par le choix des infrastructures [Kaufmann et Sager (2009)], rejoints en ce sens par Gharbi (2016) qui mentionne Pope (2008) et cite un « *spine based urbanism* » [Gharbi (2016) et Pope (2008)]. On peut en effet constater que les nouvelles franges de la ville occidentale, en particulier aux États-Unis mais également en Europe dans les banlieues, ont été organisées depuis plusieurs décennies autour de la voiture, créant un étalement urbain (qui semble en effet irréversible quand on regarde les villes américaines étendues sur plusieurs milliers de km^2 – l'aire urbaine de Phœnix fait ainsi environ 3 100 km^2 pour presque 4,5 millions d'habitants, là où le Grand Paris s'étend sur 815 km^2 pour 7 millions d'habitants environ) [Fressoz (2014)].

à 50 années, toutes les grandes décisions de développement seront faites par des villes, ce qui implique qu'un débat scientifique mondial est nécessaire pour réfléchir plus profondément aux problématiques de l'échelle plus fine et nuancée des villes [12] » [C40 (2016)]. Cette question de la place des villes dans la lutte contre la crise environnementale est d'ailleurs illustrée par la consécration d'un chapitre des contributions du groupe 3 au rapport numéro 5 du GIEC [Seto et al. (2014)]. Le tableau 1.9 met en évidence l'importance et le poids économique et démographique (et *ipso facto* politique) qu'ont les 50 plus grandes villes par rapport aux États les plus puissants. Le GIEC n'est pas le seul organisme intergouvernemental à insister sur la nécessaire implication des villes dans les processus de transformation et de transition : l'ONU [13] par le *nouvel agenda urbain* [14] en 2016 et 2017 [UN (2016, 2017a, 2017b)], la Banque mondiale, avec la publication de rapports sur les contributions des villes au changement climatique et leurs potentielles actions [Banque mondiale (2010b)], l'OCDE [15] de même [OECD (2010)], etc. Steve Hammer, spécialiste pour la banque mondiale, va même plus loin quant à la place des villes dans la venue de cette transition en clamant qu'« aucun pays ne sera capable d'atteindre ses objectifs climatiques sans une *aide importante des villes*, les villes sont le *facteur le plus important* dans l'équation climatique et nécessitent des outils et des procédés additionnels ainsi qu'un soutien majeur pour les mettre sur des trajectoires durables, résilientes et faiblement carbonées [16] » [Banque mondiale (2016)]. Cette question du rôle des villes dans la transition énergétique et la lutte contre le changement climatique permet d'ailleurs de se pencher sur d'autres objectifs de développement durable tels que stipulés par l'ONU (démocratie, gouvernance, hommes/femmes, justice climatique, pollution de l'air, etc.) : en tant qu'habitat humain, la ville ne peut être le sujet d'une réflexion compartimentée, les différents enjeux étant profondément liés [17].

II.1.b. Les causes imputables aux milieux urbains

Les villes sont en outre à la fois sources et victimes de la crise environnementale [Emelianoff (2004)]. Parce qu'elles concentrent les habitants, elles sont le lieu de la consommation d'énergie, de matériaux pour la construction, de l'utilisation des transports mais aussi de la consommation de biens et de services qui engendrent par la suite une partie non négligeable de la pollution mondiale [ADEME (2018), Galio (2018) et Lhotellier et al. (2018)]. Hoornweg et al. (2011) exposent ainsi que si les émissions indirectes liées au mode de vie des habitants de grandes villes sont prises en compte dans les bilans de celles-ci, les populations urbaines seraient responsables de 80 % des émissions mondiales [18].

12. « *In the next 20 to 50 years, all big developmental decisions will be made in cities, so we need the global scientific debate to reflect more deeply on the finer, more nuanced scale of cities* » [C40 (2016)].

13. *ONU* ou Organisation des Nations unies, aussi appelée *UN* pour *United Nations* dans ce document.

14. *Nouvel agenda urbain* ou *New Urban Agenda*.

15. *OCDE* ou Organisation de coopération et de développement économiques, aussi appelée *OECD* en anglais pour *Organisation for Economic Co-operation and Development*.

16. « *No country will be able to reach its climate goals without significant help from its cities, cities are the most important factor in the climate equation, and need additional tools and support to put them on a sustainable, resilient, low-carbon path* » [Banque mondiale (2016)].

17. C'est justement la gravité de cette crise environnementale : presque tous les pans de nos vies y ont part.

18. En suivant par exemple la nomenclature du *World Resources Institute* et du *World Business Council for Sustainable Development* utilisée par la Banque Mondiale, on peut séparer les émissions

Si l'on se restreint aux questions énergétiques, les villes sont tout de même à l'origine de près de 71 % des émissions dues à la consommation énergétique mondiale d'après l'AIE [19] [Banque mondiale (2010a) et Hoornweg et al. (2011)].

Les principaux pôles de la production de gaz à effet de serre hors énergie sont « le logement [et tout ce qu'il implique, eau, électricité, gaz, etc.], le capital [au sens de l'activité économique d'investissement en "infrastructures, constructions et machines"], le transport, l'approvisionnement alimentaire et les services publics [20] » [C40 Cities (2018a)]. La transition de l'économie du secteur secondaire au secteur tertiaire dans les pays occidentaux déplace la consommation d'énergie, et donc la production de gaz à effet de serre, de l'*industrie* vers « l'éclairage, le chauffage, la climatisation » [Banque mondiale (2010a)]. Les villes sont de grandes consommatrices d'énergies renouvelables [21] (d'après la Banque mondiale, elles consomment 72 % de l'énergie renouvelable produite) mais les sources d'énergie restent largement liées aux mix énergétiques nationaux (qui sont encore en grande partie fossiles en énergie primaire). Les milieux urbains denses doivent en plus faire face à la concentration de la demande énergétique qui impose des puissances importantes pour faire face aux pics. Enfin, le transport est un secteur capital qui engendre plusieurs problèmes comme la pollution de l'air, la consommation d'énergies fossiles, la congestion, ou encore les accidents de la route. La densification des centres et des villes importantes n'est alors pas toujours une solution et la politique de transport doit prendre en compte les réseaux de transport public mais aussi les bassins d'emplois et les profils de déplacements des habitants [Dijkstra et al. (2016)].

Quand on parle des villes, il ne s'agit pas toutefois de se pencher uniquement sur les métropoles les plus importantes. En effet, la population urbaine mondiale se concentre finalement pour moitié dans des communes de moins de 500 000 habitants. La tendance va certes à la concentration mais cette proportion devrait rester valide pour, a minima, encore une décennie [UN et al. (2014)]. Au-delà des villes en tant que telles, l'ensemble des milieux proches des villes sont concernés par les efforts nécessaires et impactés par les changements et conséquences [22] [C40 Cities (2018a)].

Il existe des différences notables dans l'impact que peuvent avoir les milieux urbains sur le climat : quand on étudie ainsi l'empreinte des villes par habitant, ce sont des modèles parfois plus vertueux *a priori* que les zones rurales, car les émissions par personne peuvent ainsi être faibles dans « *des villes efficaces et bien organisées.* » De manière générale, il reste toutefois difficile de tirer des enseigne-

---

en plusieurs catégories : celles liées *directement* à la commune et à son territoire, celles *indirectes* dues à la consommation d'électricité (qui peuvent donc être en dehors des limites communales) et celles *indirectes* ou *amont* qui viennent de la consommation de biens et de services par les habitants (produits manufacturés ou bruts importés, services extérieurs à la ville, etc.) [Banque mondiale (2010a)]. On comprend alors la conclusion de Hoornweg et al. (2011) quant aux importantes émissions indirectes des populations urbaines [Hoornweg et al. (2011)].

19. AIE ou *Agence Internationale de l'Énergie*.

20. « *Utilities and housing, capital, transportation (public and private), food supply, and government services generally contribute most to consumption-based GHG emissions* » [C40 Cities (2018a)].

21. Ces formes de production d'énergie sont en effet particulièrement intéressantes pour les villes puisqu'elles peuvent être installées localement et sous le contrôle des municipalités tout en améliorant leur autonomie.

22. Nous en reparlerons plus longuement dans le chapitre 2 à la section II.1, p. 112, au moment de choisir la bonne échelle pour notre approche.

ments sur les émissions sans étudier de multiples facteurs [Banque mondiale (2010a)].

II.1.c. Les risques encourus par les villes dans ce contexte

Les conséquences du changement climatique qui touchent la planète peuvent être séparées en deux mouvements : l'un d'*augmentation d'intensité des valeurs extrêmes* (canicule, inondation, sécheresses…), l'autre d'*évolution des valeurs moyennes* (température, niveau de l'eau, acidification des océans…). Cette décomposition s'applique aussi aux milieux urbains. La longue canicule de 2003 est peut-être le premier exemple qui a marqué les populations européennes avec la mort de plus de 70 000 personnes sur l'été, mettant en évidence le manque de préparation des communes vis-à-vis de telles situations [Banque mondiale (2010a)]. L'urbanisation est aussi régulièrement pointée du doigt lors des crues exceptionnelles qui surviennent de plus en plus fréquemment dans la région française Provence-Alpes-Côte d'Azur [Caray et Terseur (2018), Prudent (2019) et Simon et al. (2019)]. Du côté des problèmes tendanciels, on trouve la montée des eaux et l'érosion des côtes, l'appauvrissement des sols avec les risques de rupture de l'approvisionnement alimentaire que cela implique, l'épuisement ou la pollution des sources d'eau potable, etc. [23] [Banque mondiale (2010a)]. La question de la pollution de l'air est aussi capitale et la plupart des grandes villes européennes ne sont pas encore parvenues à abaisser les teneurs de certaines particules dans leur atmosphère en-deçà des seuils fixés par l'Union Européenne [Dijkstra et al. (2016)]. Une dernière difficulté trop peu mentionnée est financière : les communes ou intercommunalités ne disposent pas toujours des fonds nécessaires pour se lancer dans les projets ambitieux pour répondre à la crise environnementale et améliorer la résilience, l'égalité ou l'autonomie de leur territoire, renforçant par là-même la vulnérabilité de leurs habitants.

Il est difficile de faire un bilan exhaustif de l'avancement des engagements des États, *a fortiori* des villes, depuis l'accord de Paris de 2015 [24]. Cependant, il semblerait que les tendances actuelles soient assez peu rassurantes, peu de pays ayant pris des mesures suffisantes ou en accord avec leurs propres engagements [Cherki, Marc (2018) et Lictevout (2019)]. Par exemple, alors que l'Union Européenne a pris comme engagement de réduire de 60 % les émissions du secteur du transport en 2050 par rapport à l'année de référence de 1990, la baisse n'a été que de 5 % entre 2000 et 2013 [Dijkstra et al. (2016)]. Les risques mentionnés ci-dessus sont donc *a priori* à ne pas prendre à la légère.

II.1.d. Illustration avec le cas des îlots de chaleur urbains

Le cas des îlots de chaleur urbains (ICU) est un enjeu emblématique car central dans la question de la résilience des villes face à la hausse globale des températures. Il s'agit d'un exemple concret de problématique permettant de voir plus

23. « *Food distribution, energy provision, water supply, waste removal, information technology, and susceptibility to pandemics are all the Achilles heels of cities* » [Banque mondiale (2010a)].

24. Cet accord est le plus récent accord international majeur de lutte contre le changement climatique et la crise environnementale [CCNUCC (2018), Cossardeaux et Hiault (2015) et L'Express et AFP (2016)].

précisément les tenants et les aboutissants de cette crise au niveau local. Nous en proposons l'exploration par la suite.

L'influence du bâti sur la température extérieure

La question des îlots de chaleur urbains (ICU) ou *urban heat islands* est très prégnante à la fois dans la littérature de la recherche scientifique [Deilami et al. (2018), X. Li et al. (2019) et Rizwan et al. (2008)] mais également pour les décideurs autour de la ville [IAU Île de France (2010) et SciencesEtAvenir et AFP (2015)]. L'îlot de chaleur urbain est le phénomène qui se produit lorsqu'une différence de température majeure (plusieurs degrés voire une dizaine dans le cas de grandes métropoles [Oke (1973)]) est constatée entre un milieu urbain et un autre milieu proche géographiquement [25] (par exemple, en banlieue, en périphérie ou dans une zone rurale proche). Ces effets sont particulièrement fréquents la nuit en été, la température redescendant de plusieurs degrés dans les zones périphériques alors qu'elle reste élevée dans les centres-villes à cause des dégagements de la chaleur stockée par l'enveloppe physique des bâtiments et des revêtements artificiels [Le Bras et Masson (2015)]. Ces îlots de chaleur urbains sont en partie dus à la valeur faible de l'albédo et à la rétention de la chaleur par les surfaces foncées et artificielles (routes, trottoirs) et à la présence de végétation dans les zones extérieures. Les ICU peuvent également exister en hiver mais ils ont dans ce cas-là un effet « positif » sur la consommation énergétique, ce qui peut conduire à des besoins contradictoires : grandes avenues larges pour l'accès au soleil en hiver, habitat plutôt dense avec rues profondes pour plus d'ombre en été [Ali-Toudert et Mayer (2006)].

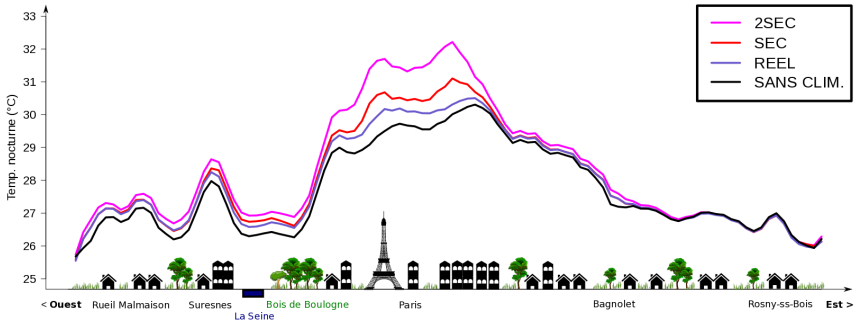


Figure 1.10 – Schéma du phénomène d'îlot de chaleur urbain pour la ville de Paris et ses alentours : on observe la hausse de température autour du centre de la ville de Paris. Dans le scénario où les habitants n'utilisent pas de climatisation (courbe `SANS CLIM`), ce qui implique une température plus élevée en intérieure que dans la situation actuelle (courbe `REEL`), l'îlot de chaleur est moins intense (source : Masson (2009, p. 4)).

Un phénomène multifactoriel

De nombreux facteurs influencent donc la présence ou non des ICU ainsi que leur intensité. M. Bonhomme (2013) résume dans un tableau présenté dans la figure 1.11 les facteurs entrant en jeu en les répartissant entre facteurs naturels, liés au tissu urbain ou aux bâtiments [M. Bonhomme (2013)]. Il est alors pertinent de tenter de mieux comprendre le rôle des éléments présentés afin d'estimer

25. Par proche, on entend ici que les deux éléments spatiaux sont dans une même zone climatique et sont donc soumis aux mêmes conditions.

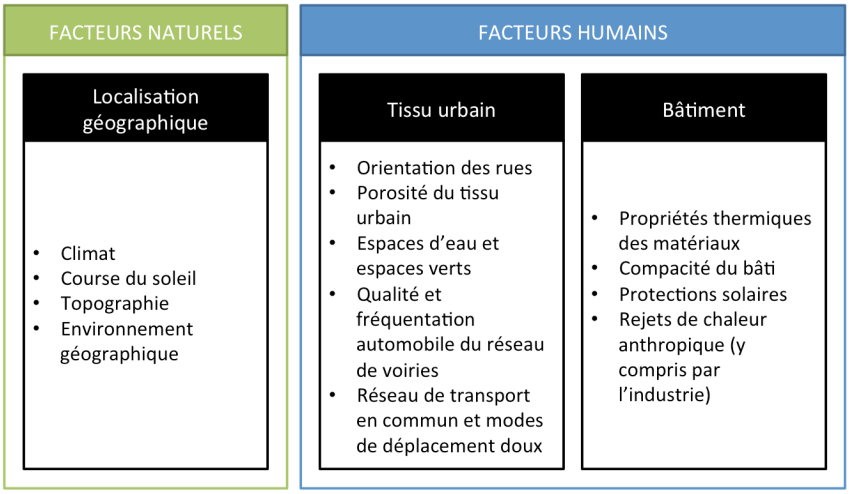


FIGURE 1.11 – Éléments influençant la création et l'intensité des îlots de chaleur urbains, certains étant exogènes à la conception de la ville tandis que d'autres peuvent être modifiés par des choix d'aménagement ou de construction (source : M. BONHOMME (2013, p. 52)).

l'importance de ces phénomènes. La modélisation des ICU peut être, par exemple, abordée sous l'angle du lien avec la densité de construction, approche qu'il nous semble pertinent de mentionner dans notre démarche proche de l'urbanisme.

L'étude récente de SALVATI et al. (2017) expose ainsi des conclusions de certains articles sur les liens entre la compacité et l'intensité de l'effet. Généralement, une augmentation de la densité conduit mécaniquement à une diminution de l'ensoleillement et de l'énergie solaire accessible mais en même temps à une augmentation de l'intensité de l'effet d'ICU (en particulier de nuit) dans les zones urbaines [SALVATI et al. (2017)]. KOLOKOTRONI et GIRIDHARAN (2008) concluent quant à eux que l'albédo de la surface est le facteur principal pour expliquer la variation de température [KOLOKOTRONI et GIRIDHARAN (2008)]. Un autre facteur important qui contribue à la naissance de tels îlots est l'orientation des rues ainsi que la forme des canyons urbains (largeur, hauteur) : une route orientée sud sera plus favorable à l'émergence de tels phénomènes [ABOELATA et SODOUDI (2019), MAVROGIANNI et al. (2009) et MAYER et HÖPPE (1987)] tandis que la présence de végétation atténue en revanche l'intensité des ICU [ABOELATA et SODOUDI (2019)]. Deux dimensions entrent donc en concurrence dans la source des îlots de chaleur, l'ombrage, les effets de masque ainsi que l'impact sur le confort hivernal d'une part, et l'artificialisation, l'albédo, l'orientation et le manque de ventilation d'autre part.

En aval du phénomène, les îlots de chaleur urbains vont avoir un impact sur la consommation d'énergie, que ce soit pour le chauffage dans les temps froids ou pour la climatisation et autres techniques de refroidissement pour les temps chauds. Il est établi que les îlots de chaleur urbains conduisent à une augmentation globale de la demande en énergie [SALVATI et al. (2017)]. L'étude de SALVATI et al. (2017) établit même qu'il y a une relation forte entre *surface couverte* (*i.e.* ratio entre la surface bâtie et la surface totale) et *demande en énergie*. De plus, ils ajoutent qu'il pourrait être pertinent de prendre en compte une forme de *densité verticale* pour différencier les zones de canyons urbains et de centres hauts, des zones denses mais à faible hauteur (avec donc moins d'effet de cache solaire). L'effet de cache peut être sous-estimé dans certaines approches [SALVATI et al. (2017)].

Des modèles pour l'étude des facteurs

Les laboratoires du *CNRM* de MétéoFrance et de Recherche en Architecture (*LRA*) de l'ENSA de Toulouse ont beaucoup produit dans ce domaine. Les projets MUSCADE et GENIUS, sont des projets pluridisciplinaires des plus complets (au sens où ils intègrent de très nombreux domaines dans une chaîne complète de modélisation), qui regroupent plusieurs approches pour construire un modèle permettant, notamment, d'étudier le phénomène des ICU [M. Bonhomme et al. (2012), LRA (2018) et Masson (2009)]. Le projet ACCLIMAT [26], réalisé en partie par les mêmes acteurs (CNRM, LRA et CIRED notamment), étudie les liens entre développement urbain, microclimat local et changement climatique [M. Bonhomme et al. (2012)]. Ce projet conclut, en ce qui concerne le climat en ville, que l'influence de la végétation est bénéfique puisqu'elle permet de contrecarrer l'effet d'îlot de chaleur urbain lié à l'accroissement de la population. Ils montrent également que cette végétalisation de la ville est compatible avec de fortes densités. En outre, les consommations énergétiques sont principalement influencées par la technologie des bâtiments et les usages de leurs habitants. Un levier potentiellement efficace consiste donc à agir pour améliorer les comportements énergétiques des habitants : un comportement vertueux peut permettre à lui seul de diminuer d'un tiers la consommation de chauffage et par trois celle de la climatisation. Rénover les bâtiments permet de faire baisser encore plus le besoin en chauffage [Masson et al. (2013)].

Il apparaît, d'une part, que les facteurs influençant les ICU sont nombreux (climat local, forme et aspect des rues, nature des revêtements, présence et densité de la végétation, taille des bâtiments, orientation des canyons urbains, etc.), parfois concurrents (la hauteur des bâtiments augmente la capacité de stockage de la chaleur mais aussi l'effet de cache) et qui n'ont pas le même impact entre été et hiver. D'autre part, développer des approches intégrant plusieurs disciplines, plusieurs points de vue, est pertinent. Plus le modèle est détaillé, meilleures sont les estimations [Cantelli et al. (2015)]. Prendre en compte la perception humaine de la chaleur ambiante est recommandé [Lin et al. (2017)]. Nous voyons aussi que ces phénomènes, déjà présents dans les grandes villes avec une sévérité importante, peuvent, lors d'épisodes caniculaires, causer une forte mortalité [Laaidi Karine et al. (2012)]. Ils seront probablement plus intenses et plus longs alors que le changement climatique continue [Le Bras et Masson (2015) et Masson (2009)]. Les villes doivent donc nécessairement prendre en compte cette problématique des ICU et plus largement de la crise environnementale dans leur développement et leurs politiques d'aménagement, en particulier vis-à-vis de la construction des bâtiments ou des espaces publics. Inversement, la construction d'approches qui étudient l'avenir des villes doit intégrer les notions de densité et d'imperméabilisation des sols.

26. Voir http://lra.toulouse.archi.fr/lra/presentation/activites/projets/acclimat (consulté le 22 septembre 2020).

II.2. La justice spatiale, la justice environnementale et les inégalités

Nous ne pouvons pas ignorer les autres problématiques sur lesquelles doivent se pencher les villes. Bien qu'elles ne soient pas le cœur des questions que nous souhaitons poser et étudier dans le présent document, il serait malvenu de passer sous silence les questions de justice spatiale et d'inégalités sociales [27]. En effet, celles-ci ont nécessairement une influence sur la façon dont la ville se construit ou sur la façon dont nous devrions aménager le territoire pour respecter nos attentes politiques sur ces sujets. Nous allons donc dresser un rapide portrait ici en insistant sur les dimensions qui nous semblent pertinentes dans le cadre de notre approche.

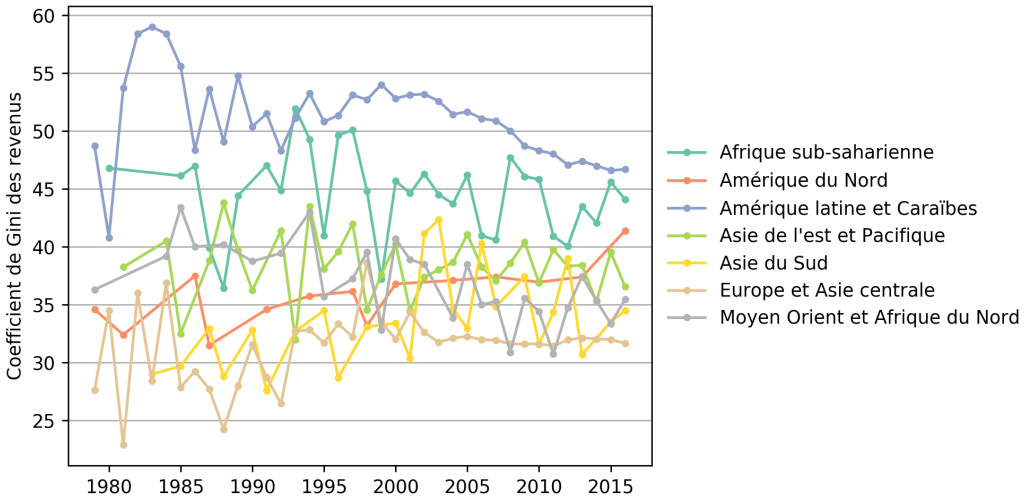


FIGURE 1.12 – Évolution du coefficient de Gini des revenus par continent (d'après des données de la Banque mondiale 2020). Ce coefficient capture le niveau d'inégalité de répartition d'une variable (ici les revenus).

La notion de justice a un double sens étymologique, celui d'équitable d'une part, et celui de vertueux, de bon, de correct d'autre part [28].

La vision traditionnelle de justice vient des travaux de John Rawls et s'intéresse à une juste répartition des biens – et des biens uniquement [KHOSRAVANINEZHAD et AKBARI (2014)]. SEN (1999) et NUSSBAUM (2003) ont par la suite élargi ce principe basique en se concentrant sur la notion de *capabilité* [29] ou capacité des individus (ou des groupes) à pouvoir agir en utilisant des biens à leur disposition et à atteindre les objectifs choisis. Ils considèrent ainsi de la sorte l'idée de distribution des biens mais également la façon dont ces derniers sont utilisés et intégrés par l'individu et plus largement par la communauté dans laquelle celui-ci s'inscrit [KHOSRAVANINEZHAD et AKBARI (2014) et NUSSBAUM (2003)].

27. L'idée de concurrence économique et touristique que se livrent les villes du monde est également importante dans la dynamique de conception des villes. Elles nous semblent toutefois plus secondaires du point de l'urbaniste et devraient être considérées dans le cas d'approches se penchant sur le point de vue du décideur politique par exemple. L'annexe A en présente rapidement les tenants et aboutissants.

28. SOJA (2010c) souligne ainsi la pertinence du mot français *droit* qui résume bien ces deux idées.

29. Un néologisme fréquent inspiré de l'anglais *capability*.

Ces enjeux d'inégalités se retrouvent également partout dans le monde. Les pays sous-développés et en développement sont même plus touchés que l'Europe et le Japon, comme visible sur l'évolution du coefficient de Gini [30] (voir figure 1.12). Les États-Unis sont également marqués par une forte inégalité (notamment de revenus [Atlasocio (2019, 2020)]), établissant une « *exception américaine* » d'un État à haut PIB par habitant mais à fortes inégalités [Arnaud (2013)]. Ces inégalités vont croissant [Damgé (2017) et Munier (2018)], avec un risque d'effet d'emballement ou de rupture [Stiglitz (2013)].

Deux notions de « justices » sont apparues (ou revenues dans le débat public), à savoir, la justice *spatiale* et la justice *environnementale* [31]. Elles concernent toutes deux spécifiquement le développement urbain, les villes étant généralement marquées par des inégalités fortes. Ainsi, en France, bien que les milieux ruraux disposent de moins de ressources avec des revenus moyens plus bas que la médiane des villes, les villes sont globalement bien plus inégalitaires [Observatoire des inégalités (2019)].

Cela se vérifie notamment dans la métropole bordelaise et le département de la Gironde. La métropole bordelaise présente en effet les « écarts de richesse (…) les plus importants » de la région [Barthélémy (2019)]. Malgré une situation en Gironde qui voit les revenus moyens dans le département situés au-dessus des moyennes nationales, les habitants de Bordeaux sont largement touchés par la pauvreté. Celle-ci se retrouve en particulier dans les communes de la rive droite de la métropole, avec des proportions d'habitants en logements sociaux fortes (« une personne sur sept »), « le sous-emploi des adultes d'âge intermédiaire, la surreprésentation des familles avec enfants à faibles ressources (…) et les retards d'entrée dans la vie professionnelle de jeunes adultes faiblement qualifiés » [OGPP (2016)]. La situation semble avoir rapidement changé, les conclusions de Victoire (2014) en 2014 étant plutôt positives [32]. Il y est toutefois noté plusieurs caractéristiques renforçant le rôle des villes face à ces problématiques : « la ville-centre et la plupart des "banlieues" proches présentent des écarts de revenus relativement importants (…) [et] plus le revenu médian de la commune est faible, plus les écarts de revenus sont marqués » [Victoire (2014)].

Steele et al. (2012) résument quant à eux le positionnement d'une ville sur les inégalités selon quatre axes, chacun étant associé à une vision différente de la justice : celle d'une distribution équitable ; celle d'une distribution compensatoire ; celle où le groupe le plus fort politiquement s'accapare les ressources ; et, finalement, celle néolibérale et régulée par le marché [Steele et al. (2012)]. L'ana-

30. Le coefficient de Gini mesure le « niveau d'inégalité de la répartition d'une variable dans la population » [Wikipédia (2020g)].

31. Pour être exact, il faudrait ajouter la problématique du genre dans l'espace urbain. On peut faire remonter le début de la recherche autour de ce qui est appelé « *urban gender studies* » en anglais aux années 80 et aux travaux de McDowell (1983). Cette thématique a été particulièrement étudiée en France au début des années 2010, à travers les travaux de Maruéjouls (2011) et le rapport de l'a'urba et du CNRS sur « L'usage de la ville par le genre » [Bernard-Hohm et al. (2011)]. Ils ont été prolongés par Méo (2012) et plus récemment par BASE (2019), Lequen (2018), et Beebeejaun (2017) à l'international. Pour autant, encore aujourd'hui, cette question est très peu étudiée et théorisée [Beebeejaun (2017)]. Les relations entre aménagement urbain à l'échelle métropolitaine et discriminations liées au genre ou au sexe étant mal connues, nous laisserons cette problématique d'importance de côté pour qu'elle fasse l'objet de développements à l'échelle de la conception des espaces publics notamment.

32. On pourra se reporter à son étude pour plus de détails sur la situation sociale à Bordeaux [Victoire (2014)].

lyse de Stiglitz (2013) souligne que, selon les secteurs, selon les situations, on se trouve dans l'une des quatre visions, avec une prédominance globale pour les deux dernières. Les pays européens disposant d'une couverture sociale plus large et plus efficace sont généralement proches des deux premières formes [Stiglitz (2013)].

Pour compléter ce panorama, et parce que leur lien avec les villes est important, nous proposons de décrire les notions de la justice issues des problèmes d'inégalités dans la société, qui découlent de l'intrication des enjeux sociaux et des ressorts politico-économiques [33], et prennent un nouveau visage avec les impacts de la crise environnementale.

La justice spatiale

L'idée que les décisions sociales influencent l'espace urbain et que les politiques publiques doivent avoir une dimension spatiale n'est pas nouvelle [34]. Comme une dynamique politique peut conduire à construire plus ou moins, à construire grand ou petit, à construire différemment, l'organisation spatiale influence également le climat social, sans suffire à résorber les inégalités [House (2018b)].

Cette notion de justice spatiale est fortement liée (complémentaire d'après House (2018a)) au principe de *droit à la ville*, énoncé par le philosophe Henri Lefèbvre durant les années 60 [Cohen (2018)]. Le droit à la ville est l'idée que les habitants puissent « décider et profiter des aménités urbaines classiques comme la connectivité, la culture, les services publics, une stabilité économique et des logements décents » [35], ce à quoi nous pourrions ajouter *quelle que soit leur couleur de peau, leur genre, leur origine…* [Cohen (2018)] Ces principes ont été reconnus comme primordiaux et sont insérés dans l'objectif 11 des objectifs de développement durable pour 2030 de l'ONU [Farigoul (2015)].

La question de la justice spatiale a connu un regain d'intérêt dans les années 60 avec les nombreuses émeutes urbaines (aux États-Unis, en France…) qui mirent en évidence des fractures sociales notamment dues à l'organisation géographique et les phénomènes de ghetto encore présents, en particulier vis-à-vis des communautés afro-américaines [Soja (2010a)]. L'accent a été mis pendant longtemps sur le « temps » dans les études théoriques et ce n'est que récemment que la dimension spatiale est apparue (ou revenue) dans le débat : la problématique de justice spatiale fait ressortir l'« espace » dans la vie humaine, qui est tout aussi capital dans la pratique des vies quotidiennes, en particulier dans un milieu urbain dense [Soja (2010c)].

33. À ce sujet, on pourra regarder les analyses poussées de Duru-Bellat et Kieffer (2008) sur les inégalités sociales à l'école en France [Duru-Bellat (2015) et Duru-Bellat et Kieffer (2008)] et le rapport du CNESCO (conseil national d'évaluation du système scolaire), *Comment l'école amplifie-t-elle les inégalités sociales et migratoires* [CNESCO (2016)]. Les travaux du prix Nobel de l'économie Stiglitz (2013) présentent plus largement, sur le cas des États-Unis, les effets et la dynamique des inégalités en société, notamment à travers l'influence des capitaux politiques, économiques mais aussi culturels et sociaux des individus ou groupes [Stiglitz (2013)].

34. On peut par exemple remonter aux cités grecques antiques [Soja (2010a)] mais aussi plus récemment aux réorganisations haussmanniennes sous Napoléon III ou aux politiques de la ville en France depuis 1970.

35. « *Shape and enjoy classic urban amenities like connectivity, culture, public services, economic security, and decent housing* » [Cohen (2018)].

L'injustice (ou la justice) spatiale peut concrètement se traduire par plusieurs phénomènes ou situations dont la gestion, les coûts d'abonnement, les fréquences et les investissements faits dans les transports en commun, principalement employés par les populations plus pauvres en milieu urbain [Soja (2010b)] ; la conception et la construction des espaces publics et des équipements urbains [House (2018b, 2019)] ; l'accès à l'éducation ou aux services publics de base, en particulier pour les habitants des banlieues éloignées [36] [Steele et al. (2012)].

La justice environnementale

La *justice environnementale* repose sur le principe que les habitants les plus fragiles économiquement, socialement (du fait du racisme et de formes de discrimination notamment) ne devraient pas être plus touchés que les personnes mieux loties par les conséquences de la crise environnementale [Steele et al. (2012)]. Inversement, l'*injustice climatique* peut être résumée par le fait que « ceux qui en ont fait le plus dans les causes du changement climatique souffriront le moins des conséquences » [Cohen (2018)]. Cette idée peut être appliquée à l'échelle internationale [37] mais aussi et surtout à celle de la ville. Un exemple qui a marqué les esprits sur cette problématique est l'ouragan Katrina qui a touché La Nouvelle-Orléans en 2005. Les conséquences de cette catastrophe naturelle ont plus durement touché les communautés Noires américaines que le reste de la population [Casselman (2015), Fussell et al. (2010) et Stein (2015)].

L'injustice environnementale se traduit, par exemple, par « l'exposition *disproportionnée* de minorités et de populations à faible revenu à des déchets toxiques, des usines polluantes, du bruit industriel, des déchets biologiques dangereux, des sites de l'industrie nucléaire, (…) des catastrophes naturelles [38] » [Pellow (2000) et Steele et al. (2012)]. À l'inverse, un accès équitable pour tous les individus à une « *qualité environnementale* » est une forme de justice environnementale [Khosravaninezhad et Akbari (2014)].

Un lien fort existe entre « *justice sociale et justice environnementale* » et a été mis en évidence dans les années 70 [Haughton (1999)]. Bulkeley et al. (2014) insistent ainsi pour que toute proposition faite par les milieux urbains au regard des enjeux environnementaux considère toujours les questions de justice [Bulkeley et al. (2014)].

La prise en compte des inégalités sociales dans la conception et le choix des réponses faites par les villes à la crise climatique doit éviter ainsi que les méthodes employées pour lutter contre les dégradations exacerbent les tensions sociales [Cohen (2018)]. Cohen (2018) suggère que c'est la meilleure solution pour lutter contre le changement climatique et Haughton (1999) abonde en disant plus largement qu'une ville ne sera pas durable sans considérer ces questions. Il faut cependant noter que la justice environnementale s'est peut-être trop concentrée sur la notion de distribution des ressources, inspirée par John Rawls, et non sur les *capabilités* des individus ou des communautés [Khosravaninezhad

36. On retrouve ici des effets similaires à ce qui est identifié par les *urban gender studies* mentionnées préalablement.

37. Par exemple, dans les négociations de la Conférence des Parties (COP).

38. « *Waste dumps, polluting factories, industrial noise, hazardous biological waste, nuclear sites, and so called "natural hazards"* » [Steele et al. (2012)].

et Akbari (2014)].

La situation française et les moyens de lutte contre les inégalités

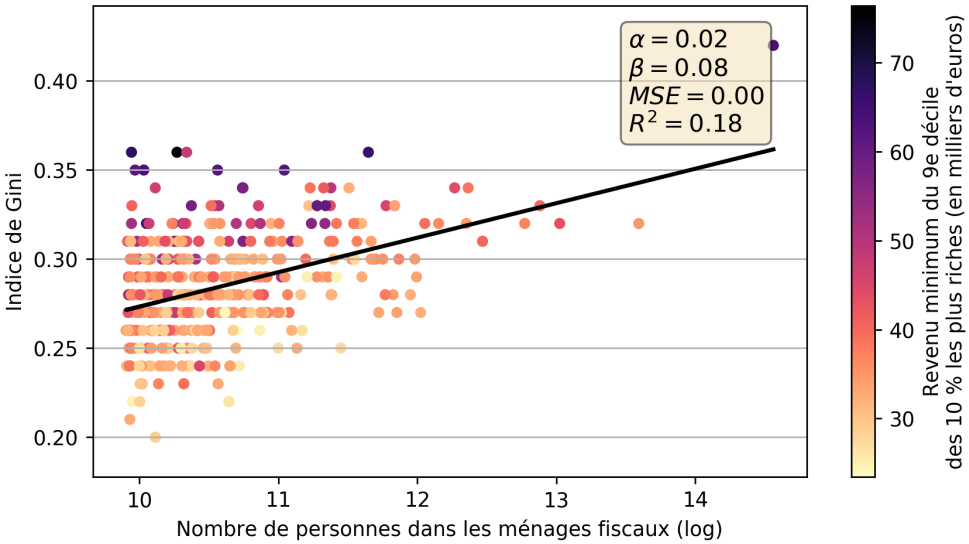


Figure 1.13 – Répartition du coefficient de Gini en fonction du nombre de membres des foyers fiscaux des communes de plus de 20 000 habitants en France (d'après des données de l'INSEE et de http://gazettedescommunes.fr). On constate en outre que plus le niveau de revenu du 9e décile est fort, plus l'indice de Gini est élevé. On a un double effet de la taille des villes et de la richesse sur les inégalités.

Quand on regarde la situation en France, la pauvreté est principalement visible dans les zones rurales et dans les pôles urbains [39], les périphéries ou le périurbain des villes les plus importantes étant généralement épargnés.

Les grandes villes sont en outre marquées par une plus grande inégalité, la pauvreté y étant présente tout comme les hauts revenus qui se concentrent surtout dans les principales métropoles de France. La figure 1.13 illustre cette tendance, le coefficient de Gini des villes de plus de 20 000 habitants étant positivement corrélés à la population, c'est-à-dire que plus la population d'une ville est importante, plus cette ville va avoir tendance à présenter des inégalités plus importantes.

L'État français a donc mis en place une politique de la ville, c'est-à-dire une politique *sociale territorialisée*. Cette politique est née après les crises des années 60 et la découverte des limites des grands ensembles construits à partir de 1950 et résultant d'une politique de « production massive d'habitat social », ceux-ci ayant très mal vieilli et offrant de mauvaises conditions aux habitants. Pour répondre à cette dégradation de la qualité de vie d'une partie des habitants, en particulier en périphérie et souvent parmi les groupes les plus pauvres, les gouvernements successifs ont tenté de favoriser l'étude de solutions intégrant l'ensemble des

39. Les instances régionales de l'INSEE produisent régulièrement des documents étudiant les conditions de vie dans leur territoire. On peut trouver par exemple des analyses sur la Picardie [Maillard (2015)], le Languedoc-Roussillon [Dadoun (2014)], la Bourgogne-Franche-Comté [Chassard et René (2016)] et l'Auvergne [Cauvert (2015)]. Les conclusions de ces documents sont similaires même si les détails varient grandement selon les configurations économiques (principaux employeurs) et sociales des régions. Globalement, elles notent des facteurs discriminants communs comme la monoparentalité, le vieillissement de la population, l'absence de véhicule individuel, le chômage, particulièrement des jeunes, et le manque de qualifications.

problématiques urbaines et ne se concentrant pas uniquement sur le logement comme – cela était le cas pour les grands ensembles – mais combinant le logement avec une amélioration des actions sociales. La politique de la ville se concrétise par un *contrat de ville* entre 2001 et 2006 puis par un *contrat urbain de cohésion sociale* entre 2007 et 2014. L'objectif de ces contrats est de faire un partenariat entre l'État, les collectivités territoriales et d'autres acteurs (chambres, organismes publics, etc.) pour améliorer les conditions de vie par des projets concrets, en particulier dans certains quartiers appelés Zones Urbaines Sensibles (ou ZUS).

Ces contrats et les ZUS ont été ensuite remplacés par l'instauration de *quartiers prioritaires de la politique de la ville* par la loi du 21 février 2014 de *programmation pour la ville et la cohésion urbaine*. Toujours sur le même principe de coopération entre les acteurs et les administrations, le but est de mettre en place des mesures concrètes pour le développement économique (aides fiscales, zones franches, pépinières, etc.), la cohésion sociale (par l'arrêt du recul des services publics, aides aux familles, à l'éducation et à l'insertion sociale, etc.) et l'urbanisme (voiries, réseaux, etc.). L'implication des habitants au travers des « conseils citoyens » permet que ces contrats soient généralement suivis de mesures réellement efficaces sur le terrain et pas seulement de coups de communication.

La politique de la ville et les contrats qui en découlèrent illustrent la difficulté à transformer la ville. Cette approche est *transversale*, décloisonnant un domaine plutôt sectorisé, *participative*, impliquant les citoyens et conduisant parfois à une dynamique collective ou à une forme de démocratie de proximité, *communicable*, incitant les élus à s'en saisir au risque de n'être qu'une vitrine. Il s'agit d'une obligation de moyens plutôt que de résultats et la grande variété voire la démultiplication des acteurs impliqués rend l'organisation et la prise de décisions ambitieuses complexe. Enfin, c'est une politique *territorialisée* qui adapte une intention aux spécificités locales.

II.3. Des enjeux qui attendent des politiques spatiales

II.3.a. Les forces des villes face à l'urgence et l'importance de ces enjeux

Les villes ne sont heureusement pas démunies face à l'ensemble des enjeux que nous avons mentionnés ci-dessus.

Une place et des capacités d'innovation inédites

Elles sont à la fois les premiers intervenants, les acteurs privilégiés du déploiement de politiques nationales [Banque mondiale (2010a)] et des lieux de création et d'innovation [Barba-Sánchez et al. (2019) et Bettencourt et al. (2007)]. Leur croissance est un facteur favorable à un dynamisme économique, aux investissements dans de nouveaux bâtiments abordables et efficaces énergétiquement, à la mise en place d'un système éducatif solide, etc. [Dijkstra et al. (2016)]. Parce qu'elles rassemblent une large part de la population, elles ont aussi un poids démocratique non négligeable et peuvent plus facilement – et même doivent – intégrer leurs habitants dans les démarches de conception pour asseoir la légiti-

mité ou la pertinence de certaines approches [Banque mondiale (2010a)]. La densité urbaine rend également rentables certains services qui le sont difficilement autrement [40] [Dijkstra et al. (2016)].

Un nouveau leadership international ?

L'élection de Donald Trump, climato-sceptique convaincu [Cantié (2018) et Kauffmann, Sylvie (2020)], à la présidence des États-Unis en 2016 l'a montré : l'effort ne peut être uniquement mondial par des accords intergouvernementaux ; les villes peuvent être des acteurs plus engagés que la machine institutionnelle et bureaucratique des États-nations [Jeantet (2016) et Massiot (2019)]. Il y a même, selon certains, une véritable nécessité pour un *leadership des villes dans la transition énergétique* [REN21 (2019)]. Celles-ci subissent déjà certaines conséquences et doivent faire face à des risques importants liés à la crise environnementale, tendance qui ne va pas aller en s'améliorant au vu des projections climatiques récentes. La notion du « *droit à la ville* » semble aller de pair avec l'idée de *justice climatique* [Rochon (2014)].

Les villes sont de plus en plus à l'initiative depuis plusieurs années par des engagements politiques et médiatiques marqués mais aussi par la création de collectifs de communes à travers le monde. Un sommet spécial a ainsi été organisé les 4 et 8 mars 2018 à Edmonton, au Canada, par le GIEC, *Cities IPCC*, pour débattre de la place des villes et du besoin de leurs actions dans la lutte contre le changement climatique [Allison Bridges (2018)]. Au cours de ce sommet parut notamment un rapport du groupe *C40 Cities* [41] qui met en évidence que les villes produisent bien plus de CO_2 qu'on ne le pensait [C40 Cities (2018b)]. Ce collectif *C40* n'est pas le seul et de nombreux autres groupements existent ainsi à travers le monde pour le partage de méthodes ou la coopération, tels que *100 Resilient Cities*, *Eurocities*, *World Mayors Council on Climate Change*, *Covenant of Mayors*, *ICLEI – Local Governments for Sustainability*, *Global Covenant of Mayors for Climate & Energy*…

II.3.b. Le rôle de la planification urbaine : urbanisme au centre, et synthèse

La planification urbaine, comme nous venons de le voir avec la politique de la ville en France, peut se saisir de ces problèmes d'inégalités. Watson (2009) remarque que les méthodes de planification dans les pays « du nord » produisent des systèmes qui perpétuent voire agravent les inégalités et leur transformation contribuerait donc à en diminuer l'intensité. Watson (2009) propose ainsi de passer d'une planification qui « sert les intérêts privés avec des ressources publiques » à une planification qui revient à l'intérêt général et « protège les besoins des personnes ordinaires plutôt que ceux d'une minorité privilégiée, les intérêts

40. Cette idée qu'il existe un seuil en-deça duquel les services ne sont plus viables économiquement sans apports à perte de la collectivités, peut être mise en relation avec l'abandon progressif des petites villes en milieu rural d'où les services publics se retirent progressivement. C'est le pendant de la concentration de la population dans des métropoles toujours plus importantes.

41. Ce groupe a principalement été mis en place par la ville de Paris pour encourager et favoriser la lutte des villes contre le changement climatique [Hidalgo et Lee (2017) et Leahy (2018)] en proposant des programmes, des projets, des pistes de recherche, des partenariats pour aider chaque ville à travailler à sa transition énergétique et à mettre en place les réformes nécessaires et ambitieuses [C40 Cities et McKinsey Center for Business and Environment (2014)].

publics plutôt que privés, le futur plutôt que le présent » [Watson (2009)]. On notera ici à nouveau l'émergence de cette idée qu'il faut intégrer le futur dans la démarche de planification et projeter les décisions sur le long terme. Les villes sont d'ailleurs parfois démunies face à ce besoin de prospective et n'ont pas toujours les soutiens techniques pour éclairer leurs choix d'aménagement ou de politique.

La vision de Le Corbusier, et plus tard du mouvement de l'urbanisme progressiste, était de produire une ville fortement contrôlée par son organisation pratique, dont notamment son découpage en zones spécialisées [Choay (1979) et Watson (2009)]. À l'opposé, la tendance aujourd'hui est plutôt de revenir à la mixité d'usage, à la mixité sociale, à une forme de liberté dans les actions et les mouvements des citoyens, correspondant par là aux idées de Nussbaum et Sen sur le besoin de chacun de déployer ses *capabilités* [Nussbaum (2003)]. La difficulté subsiste qu'il faut transformer l'existant pour permettre ces utilisations en respectant l'identité du lieu ou tout simplement les contraintes économiques et physiques [Emelianoff (2004)]. « Les gouvernements des villes ne sont plus conçus comme des machines à produire des services à la population dans un contexte idéologique favorable à la réduction des inégalités sociales et spatiales, mais comme des entités porteuses d'un projet, d'une stratégie » [Morel-Journel et Pinson (2013)]. Ce constat suppose à nouveau l'existence d'outils d'aide à la mise en place de telles stratégies.

Passer d'un gouvernement de la ville à une forme de gouvernance collective est une suggestion pour améliorer la prise-en-compte des enjeux importants – les autorités publiques doivent en effet arbitrer entre le besoin de promouvoir l'attractivité économique et celui de lutter contre les formes d'inégalités qui apparaissent – et aboutir à des procédés de planification « transparents, participatifs et inclusifs » [Watson (2009)]. Les inégalités sont en outre exacerbées par le phénomène de mondialisation auquel il est difficile de s'opposer au niveau local. La promotion de boucles d'économie circulaire, de monnaies locales, l'insertion d'agriculture urbaine sont, parmi d'autres, des moyens de redonner le contrôle de l'évolution de la ville aux citoyens [Manier (2016)].

Que ce soit pour les inégalités spatiales ou environnementales, la notion d'espace est primordiale et s'insère dans les politiques y ayant trait. Nous voyons donc qu'une vision territorialisée d'une métropole s'avère nécessaire pour le suivi des évolutions locales. La planification urbaine et l'aménagement sont justement le support spatial des politiques locales de développement par la transformation du territoire, du bâti et des espaces publics.

Ainsi, et pour résumer, nous avons souligné dans cette partie que les villes :

- sont confrontées à une crise environnementale dont elles sont victimes et actrices,
- doivent transformer les secteurs du transport et de la construction pour lutter contre la pollution de l'air et les îlots de chaleur urbains (entre autres),
- sont prises dans une compétition à l'échelle nationale et internationale pour les emplois et le tourisme [42], impliquant des choix d'aménagement et d'image parfois éloignés de leurs préoccupations locales,

42. Voir annexe A, p. 367, pour plus de détails.

– sont les foyers principaux des inégalités, par le regroupement des hauts et faibles revenus au même endroit,

– sont donc appelées à rechercher une justice spatiale *et* environnementale,

mais aussi qu'elles :

– ne sont pas démunies et peuvent s'offrir, par leur poids économique et démographique notamment, comme alternatives crédibles à la lenteur des gouvernements,

– sont des foyers d'innovation et de créativité,

– peuvent profiter de leur territoire environnant et de leurs voisines pour travailler sur des formes d'autonomie locale et d'atténuation des inégalités infra-régionales.

Les villes ont un travail de projection spatiale et temporelle à faire, pour réconcilier les échelles internationales, nationales, régionales et locales, et s'assurer de l'adéquation des politiques choisies avec leurs intentions sur le long terme.

III. Propositions de villes futures

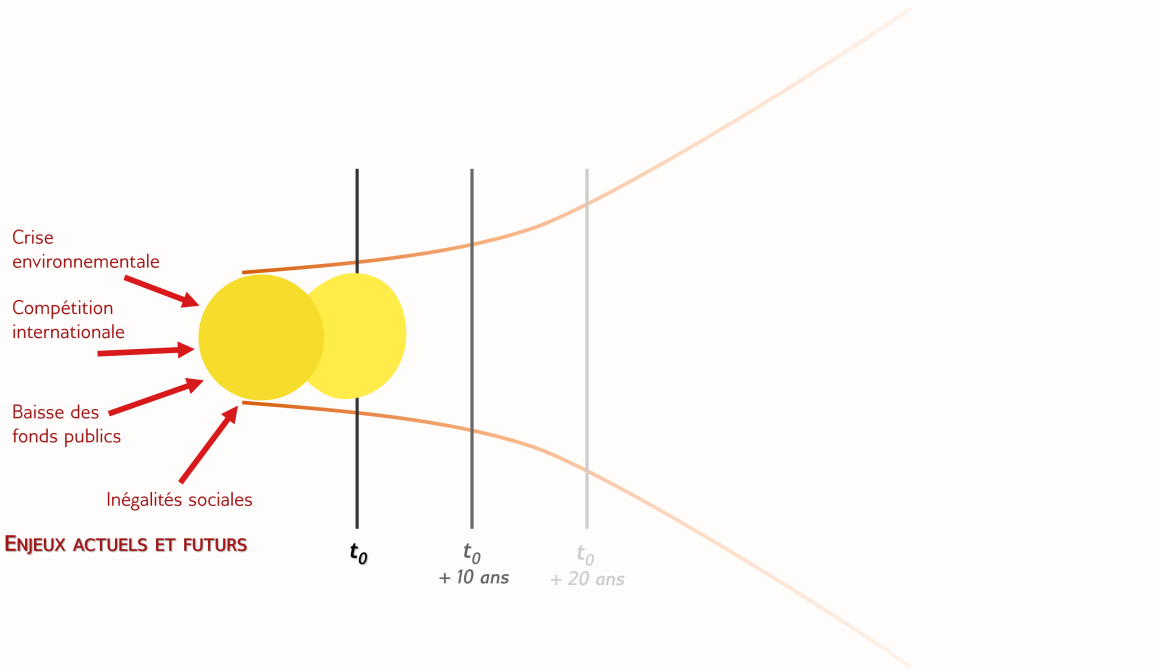


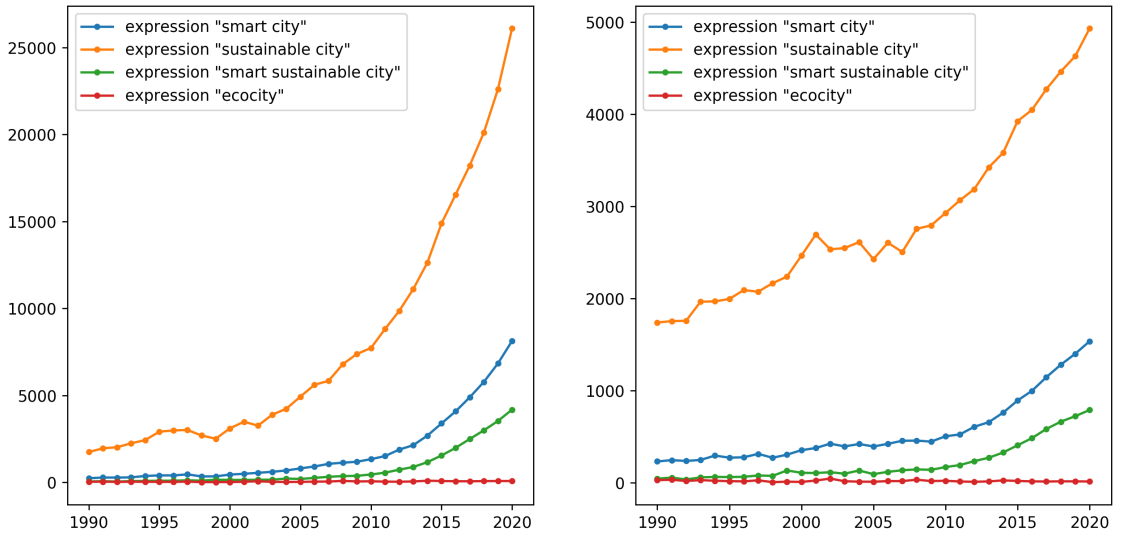
FIGURE 1.14 – Résumé du contexte : nous avons décrit plus spécifiquement les enjeux qui s'appliquent aux villes aujourd'hui.

Quelles formes de villes sont-elles proposées face à tous ces enjeux ? Comment scientifiques et industriels proposent-ils, depuis plusieurs décennies maintenant, de répondre aux besoins des villes et de leurs habitants ? Quelles sont les approches employées, les moyens mis en œuvre, les choix politiques posés, les acteurs positionnés ? Comment ces propositions se traduisent-elles dans l'urbanisme ou dans la façon dont on construit les villes aujourd'hui ? Les enjeux auxquels l'humanité et le milieu urbain plus spécifiquement font face aujourd'hui imposent un exercice de prospective pour éclairer le futur, imaginer l'habitat que

nous souhaitons et mener une réflexion spatiale comme support de déploiement des politiques découlant de ces projections (voir figure 1.14).

Dans cette partie, nous étudierons donc les formes de villes futures qui émergent dans la littérature scientifique, en particulier au regard de la crise environnementale. Ces propositions peuvent être séparées selon deux caractéristiques, *durables* et *intelligentes*, qui peuvent être combinées en une troisième forme (section III.1). Nous soulignerons alors les apports de la prospective dans cette description et dans la réflexion autour de l'aménagement urbain (section III.2).

III.1. Formes de villes futures



(A) Valeurs absolues

(B) Dynamiques corrigées par le retrait de l'évolution du nombre général de publications sur la ville

FIGURE 1.15 – Évolution du nombre de publication sur `Science Direct` pour différentes requêtes relatives à la ville *durable* ou *intelligente* (exécutées le 22 septembre 2020).

Deux idées principales de *villes* sont apparues depuis le commencement des réflexions autour du changement climatique et des crises pouvant en découler : la ville *durable* d'abord, en réponse à l'émergence de ce besoin d'une société soutenable (*sustainable* [43]) ; puis plus récemment, la ville *intelligente* ou *smart*, notamment avec l'essor des technologies de l'information et de la communication [AHVENNIEMI et al. (2017)]. Quand on étudie la bibliographie, on trouve ainsi que l'expression *ville durable* (*sustainable city* en anglais) est plus ancienne et est largement utilisée dans la littérature scientifique (ou en tout cas l'échantillon considéré) depuis les années 90 tandis que l'idée de *ville intelligente* apparaît plus récemment (vers les années 2000 - 2005) et a été bien déployée depuis (le nombre d'articles publiés sur `Science Direct` a été multiplié par 10 entre 2005 et 2020) même si elle reste moins répandue que celle de ville durable. La figure 1.15 présente l'évolution du nombre de parutions référencées dans `Science Direct` sur

43. Le mot anglais *sustainable* présente un double sens de « justice intergénérationnelle » (durée) et de « justice intragénérationnelle » (équité sociale) [BURBAGE (2013) et HAUGHTON (1999)]. Par souci de simplification du vocabulaire, nous utiliserons ici indifféremment les traductions françaises de *durable* et de *soutenable*, en gardant bien à l'esprit ces deux prérequis qu'ils ne contiennent pas nativement.

ces trois sujets reflétant l'importance relative de ces champs de recherche. Le caractère *intelligent* de la ville peut être vu comme une « réponse scientifique aux exigences environnementales liées au défi climatique et à la surpopulation » [Vanin (2019)] et se décline en deux visions distinctes : la première plus *technologiste* se concentre sur l'emploi de nouvelles technologies et sur l'efficacité des systèmes ; la seconde réfléchit plutôt sur l'intelligence générale par la collaboration des différents secteurs et sur la place du citoyen [Monzon (2015)].

Ces trois approches sont finalement radicalement différentes, à la fois par leurs objectifs et le concret de leurs méthodes : la ville *durable* se concentre sur les questions environnementales et l'idée de transmission aux générations futures tandis que la *smart city* dans ses deux formes se penche plutôt sur les aspects sociaux, économiques, d'efficacité et d'optimisation [Ahvenniemi et al. (2017)]. Certains proposent donc de rassembler ces démarches sous l'appellation « *smart sustainable city* », *ville intelligente durable*, définie comme chercher à atteindre la soutenabilité par le soutien de nouvelles technologies et leur utilisation optimale [Ahvenniemi et al. (2017) et Laconte (2018)]. Nous allons donc, dans les trois sections suivantes, nous pencher plus précisément sur ces trois formes de villes futures [44] pour mieux comprendre les propositions de chacune d'elle face aux enjeux présentés précédemment et la façon dont elles s'insèrent dans l'urbanisme et la fabrique de la ville.

III.1.a. Vers une ville « durable »

Nous avons vu précédemment que le monde urbain était marqué par une croissance rapide et continue depuis plusieurs décennies. L'aménagement et les désirs des habitants d'accéder à la propriété, de revenir à des espaces plus naturels (ou tout du moins présentant plus de verdure), et les facilités de déplacement permises par le véhicule particulier ont conduit à un étalement urbain sans précédent. C'est dans ce contexte que la notion de ville durable s'inscrit [Emelianoff (1999)]. Celle-ci est particulièrement floue, comme beaucoup d'expressions à la mode [45] [Mathieu et Guermond (2011)], oscillant entre des visions plus ou moins souples [Haughton (1999) et Zuindeau (2006)].

44. Il aurait été possible de procéder à l'étude d'autres formes comme celles proposées par Hassan et Lee (2015) dont la « ville compacte », la « *ubiquitous eco-city* » ou encore l'« éco-ville zéro carbone » [Hassan et Lee (2015)] ou encore la « ville post-carbone » [Emelianoff (2015) et Peyrache-Gadeau et Pecqueur (2011)] mais les trois visions mentionnées ci-dessus sont les trois formes les plus répandues et les plus matures de la littérature scientifique consultée.

45. Hassan et Lee (2015) critiquent d'ailleurs cette confusion entretenue, même au sein de la communauté scientifique, sur la définition de la *sustainable city*. Ils exposent ainsi qu'il arrive fréquemment que les explications se contredisent et produisent une vision « déraisonnable » de l'enjeu rendant impossible la réussite et l'avénement d'une telle forme de ville [Hassan et Lee (2015)]. Sans remettre en cause ces constatations, on peut noter que les définitions exposées ici de la ville durable ont plutôt tendance à dessiner un principe, une direction plutôt qu'un état atteignable et qu'il paraît donc surprenant de chercher à « *obtenir* » la *sustainability* [Emelianoff (1999)]. Les auteurs concluent d'ailleurs leur étude en suggérant de remplacer la notion de *ville durable* par celle de *transition vers la ville durable*, ce qui a le mérite de clarifier l'ambiguïté [Hassan et Lee (2015)].

La définition du rapport Brundtland

Le terme de « *sustainability* » est apparu à la fin des années 80 avec le célèbre rapport Brundtland, « *Notre avenir à tous* », et est alors défini [46] comme un état « qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs [47] » [WCED et Brundtland (1987)]. On peut souligner la présence de trois pans principaux dans cette définition signalés par Emelianoff (1999), qui sont à la base du projet de ville durable.

1. Tout d'abord, la ville durable n'a pas pour but de s'adapter uniquement aux problèmes présents puisque cela reviendrait à ignorer que la crise climatique aura principalement des effets à moyen et long terme à cause de l'inertie des différents systèmes naturels. C'est l'inscription de la ville dans le **temps long**, de la permanence de l'identité dans la durée.
2. En deuxième lieu, la définition du rapport Brundtland parle de « besoins », c'est-à-dire d'une **certaine qualité de vie** à proposer à ses habitants. Nous ne referons pas ici l'étude de la pyramide des besoins de Maslow mais, pour toute ville, le but premier reste de loger et de permettre à des humains de vivre. Cela exclut de choisir comme principal voire seul objectif une question de rentabilité ou un choix politique. Enfin, il est question d'habitants, à travers ces besoins et la mention de « générations futures [48] ».
3. Emelianoff (1999) suggère enfin que le projet de la ville durable soit un projet « **politique et collectif** », par exemple en intégrant les habitants dans la démarche [49] mais surtout en s'attaquant aux inégalités sociales (« disparité des revenus, accessibilité variable des services urbains, inégalité des chances en matière d'éducation, (…) qualités de vie ») et aux discriminations, problèmes fondamentaux sur lesquels la conception de l'espace et les politiques urbaines peuvent agir, et qui peuvent être amplifiés par « l'inégalité écologique ».

La *soutenabilité* de la ville inclut donc *a priori* des dimensions sociales, économiques et environnementales [Hassan et Lee (2015)], ce dernier point ayant été l'angle d'approche souvent privilégié, en particulier par les outils d'évaluation développés dans ce cadre [Ahvenniemi et al. (2017)]. La découverte que l'énergie est au cœur des problèmes environnementaux a encore favorisé l'accent mis sur ce point [Emelianoff (2015)]. Il faut alors faire attention, dans le cadre de politiques ou de projets urbains, à ne pas négliger les dimensions économiques et sociales,

46. Il existe d'autres définitions proposées dès le début des années 80 mais nous avons choisi de nous concentrer sur celle officiellement fournie par ce rapport pour l'ONU. L'article de Hassan et Lee (2015) étudie par exemple plusieurs définitions qu'il met en relations. On pourra aussi lire Höjer et Wangel (2015) qui s'intéressent à la construction de la définition d'une *smart sustainable city* en proposant par exemple deux approches, l'une bottom-up, l'autre top-down.

47. D'après la traduction originale du rapport.

48. Haughton (1999) sépare quant à lui les principes d'équité nécessaires à un développement durable en quatre idées : une équité intergénérationnelle – qui découle assez logiquement de la définition employée ici –, une équité intragénérationnelle, une équité géographique et une équité des procédures (« *procedural equity* »), ces trois dernières revendications étant absentes du texte du rapport Brundtland.

49. Certains auteurs déplorent le manque de participation des citoyens dans les processus mis en place au nom du *développement durable* [Ahvenniemi et al. (2017)]. Nous verrons dans la section IV.2.d, p. 60, que l'idée de « concertation publique » est régulièrement mise en avant par des projets sans que cela soit fait de façon pertinente (par exemple, en n'en faisant qu'un outil de communication des services techniques urbains à la population [Mathieu et Guermond (2011)]), voire au détriment d'études scientifiques qui sont décridibilisées devant la primauté de la « parole du public » [Füzesséry (2010)].

une ville ne pouvant être durable sans habitants [Emelianoff (1999, 2004)]. On assiste donc à la rencontre de deux échelles, l'une locale et l'autre « planétaire [50] », les enjeux globaux n'étant pas toujours faciles à concilier avec la ville existante et le besoin de respecter (au moins en partie) l'identité locale [51] [Emelianoff (2004) et Peyrache-Gadeau et Pecqueur (2011)].

Cette vision n'est donc pas sans défaut [52] et Emelianoff (2004) en cite quatre principaux : un « désengagement politique [53] », l'absence de considération des « inégalités écologiques » et territoriales, un éloignement des habitants qui n'ont pas leur place dans une « affaire d'expertise », et enfin un prix économique important.

Une nouvelle approche d'aménagement

L'idée de ville durable s'est souvent concentrée en pratique sur l'échelle d'un bâtiment (rénovation, isolation, etc.) mais a été récemment élargie à l'échelle d'un quartier. Ceci améliore l'efficacité et la pertinence des analyses effectuées puisqu'en ayant un point de vue plus global, il est possible de prendre en compte les moyens de transport, le climat local et les services en plus du bâti [Ahvenniemi et al. (2017)]. Il est en outre plus facile de mettre en place un quartier innovant, comme proposition alternative à une échelle plus réduite avant d'en faire un principe d'aménagement. Il faudrait pousser le mouvement encore plus loin en ayant une approche globale et holistique de la ville toute entière, voire de l'aire urbaine ou de l'aire d'influence pour éviter de créer une concurrence ou des inégalités entre les quartiers [Emelianoff (2004)].

La ville durable semble alors s'opposer aux éléments moteurs de l'urbanisation passée [54] comme l'utilisation prédominante de la voiture individuelle, l'aspiration à la maison individuelle avec jardin et l'étalement urbain, la spécialisation des quartiers, le zonage fonctionnel et urbain du territoire, chacun de ces principes étant finalement en partie source des problèmes que la ville rencontre aujourd'hui. Elle s'y oppose notamment par des tentatives de réenchantement de la

50. Haughton (1999) mentionne par exemple l'importance des systèmes d'équilibrage planétaires qui imposent à l'humanité le respect des limites planétaires et une responsabilité pour éviter un déréglement et notre propre destruction éventuelle.

51. Cette identité n'est pas forcément esthétique et son respect n'exclue pas les innovations architecturales ou programmatiques.

52. Mathieu et Guermond (2011) insèrent plus généralement cette question de la ville durable dans un débat plus large d'épistémologie autour de la politique urbaine : cette recherche de la durabilité n'est-elle pas « un habillage des politiques non résolues sous les pseudo habits neufs d'une prise de conscience mondiale, un recyclage des anciens objectifs et des pratiques politiques donnant l'illusion de la conciliation entre pauvreté, développement du libéralisme économique et préservation des ressources renouvelables et de la biodiversité ? » Pour eux, il s'agit notamment du problème de la place à donner à cette nouvelle idéologie qui manque d'une cohérence dans la pratique de son déploiement, par exemple par des approches trop sectorielles qui ne fonctionnent pas ensemble. Les auteurs mentionnent même l'idée de « *mystification sociale* » et insistent sur le besoin de ne pas suivre le discours commun sur le développement durable tout en réfléchissant aux implications épistémologiques de l'apparition de ce nouveau principe se voulant universel et incontestable [Mathieu et Guermond (2011)].

53. Ce point rejoint le constat d'emprise grandissante des entreprises dans l'aménagement urbain et la planification que nous verrons dans la section IV.2 du présent chapitre, p. 57.

54. Il est possible de voir dans cette opposition le résultat de la lente intégration dans la société de la contradiction que donne la charte d'Aalborg en 1994, soixante ans plus tard, à la charte d'Athènes, ou encore comme le refus de l'urbanisme « hygiéniste et fonctionnaliste » du siècle dernier [Emelianoff (2004) et Mathieu et Guermond (2011)].

densité [Peyrache-Gadeau et Pecqueur (2011)], par l'aménagement des espaces publics, par la mixité fonctionnelle et la création de lieux multiples, par la végétation [Emelianoff (2004)], par la transformation de la ville existante pour en faire une ville « plus humaine » (« *on human terms* ») [Haughton (1999)]. Les villes sont enfin invitées à réorganiser leurs choix d'investissement et d'attribution de leurs fonds [Emelianoff (2004)] et certaines choisissent alors de faire confiance au marché selon les principes d'économie néoclassique [Haughton (1999)].

Quelle place pour la technologie ?

Les indicateurs jouent « un rôle vital » dans la comparaison entre villes, dans l'évaluation de la réussite des décisions, dans la transparence et pour la communication [Hiremath et al. (2013)] mais il n'est pas toujours facile d'évaluer les impacts précis d'une mesure spécifique [Emelianoff (2015)]. Les nouvelles technologies qui sont largement invoquées par le modèle de la *smart city* [55] peuvent ainsi contribuer à se rapprocher d'une ville durable. Toutefois, il faut faire attention que les principes cités au début de cette section ne soient pas étouffés par une recherche de « *performance écologique* » et de « *prouesse éco-technologique* » qui pourraient se suffire comme but faisant perdre de vue les idées sous-jacentes à la contruction d'une ville durable [Emelianoff (2004)]. Depuis quarante ans que la notion de développement durable est présente dans le débat public, l'absence d'effets importants de ces « solutions » face aux crises sociale et écologique implique qu'« une telle vision technicienne de la notion est tout à fait insuffisante » [Emelianoff (2007a) et Zuindeau (2006)].

Une tendance sous-jacente de remise en question des paradigmes

Il est alors possible de voir, dans cette idée d'une ville concentrant les besoins de changement alors que l'humanité doit faire face à plusieurs crises majeures de son histoires, une tentative de redescendre une partie des prises de décision et des initiatives à l'échelle locale. Les villes deviennent à la fois source et solution, notamment face à l'impuissance des États à s'emparer des problématiques telles que le changement climatique [Emelianoff (2004)]. Emelianoff (2015) va même plus loin 10 ans après avoir établi le constat précédent et suggère que les villes pourraient « *ouvrir des voies pour un autre modèle de développement* » en parlant de « post-capitalisme ». Zuindeau (2006) abonde dans ce sens en réfutant la pertinence du principe de *substitualité* et en écrivant que « le développement durable (…) appelle à un changement de paradigme » tout en reconnaissant que toutes les propositions (comme la décroissance) ne sont pas pertinentes partout, « la moitié de la population [mondiale subsistant] à la limite de la survie » [Zuindeau (2006)]. Cette décentralisation est toutefois lente en France notamment, où la tradition jacobine a positionné les villes en attente de l'État pour véritablement s'impliquer sur ces enjeux [Emelianoff (2007a)].

Le mouvement spatial inverse de réorganisation des pouvoirs est aussi visible : alors que la mondialisation a poussé les grandes métropoles à se lancer dans une compétition sur la scène internationale [56] [Emelianoff (2015)], la crise environnementale et le développement durable les inviteraient plutôt à se réintéresser à

55. Voir plus loin, section III.1.b, p. 37.
56. Voir annexe A, p. 367, pour plus de détails sur ce sujet.

leur territoire et leurs voisinages non plus comme moyen de dynamisation mais comme source d'autonomie et comme contexte environnemental [Hassan et Lee (2015)]. On retrouve l'idée d'un nouveau leadership (voir section II.3.a du présent chapitre, p. 28) mais cette fois à l'échelle régionale. Haughton (1999) va même plus loin et stipule que travailler à la ville durable sans considérer ses environs est « futile » et « dénué de sens. » La ville dépend nécessairement d'importation de matériaux, de produits manufacturés, d'eau, d'énergie… qui ne sont pas sur son territoire [Haughton (1999) et Höjer et Wangel (2015)]. Prétendre à une ville durable sans avoir étendu les changements à ces importations et à leurs implications serait alors erroné [Höjer et Wangel (2015)] : certaines approches, que l'auteur regroupe sous le nom de « *self reliant cities* », s'intéressent d'ailleurs particulièrement à la diminution de ces impacts [Haughton (1999)]. Cela renforce l'idée que, comme souvent dans l'aménagement urbain, la soutenabilité et les trajectoires de société qui y mènent restent spécifiques à un lieu et à un temps, à un territoire et aux flux qui le font vivre [Hassan et Lee (2015) et Haughton (1999)].

La ville durable, un mouvement prospectif plutôt qu'un état

Concluons en remarquant que la ville durable reste idéelle, qu'elle n'existe pas, tout comme la ville parfaite n'existe pas : il s'agit d'un mouvement, de la mise en place d'une dynamique, d'actions vers un but, vers cet objectif de justice sociale, de respect des limites environnementales de la planète et des générations futures [Emelianoff (1999) et Mathieu et Guermond (2011)]. De nombreuses villes en ont fait leur marque à l'international, par des prises de positions engagées. Emelianoff (2004), en 2004, ne voulait alors pas affirmer ou infirmer que les villes européennes devenaient durables : au regard de ce qui vient d'être exposé, qu'importe qu'elles le soient ou non, tant qu'elles y aspirent et agissent pour l'être en mouvement et sur une trajectoire adéquate.

III.1.b. Vers une vision « *technologiste* » de la *smart city*

La deuxième forme de *ville future* est celle d'une *smart city* ou *ville intelligente*. Celle-ci n'est pas encore clairement définie, malgré le grand nombre de projets qui s'en revendiquent : Al Nuaimi et al. (2015) pensent ainsi que le concept est dans un état où « *je la reconnais quand je la vois* », c'est-à-dire qu'il n'y a pas de nomenclature universelle ou standardisée pour en circonscrire les principes [Al Nuaimi et al. (2015)]. La *smart city* désigne un objet qui n'existe finalement pas vraiment et son sens peut varier largement selon les acteurs. Ceux-ci peuvent alors facilement s'en prévaloir de façon légitime dans le flou sémantique existant. Plus précisément, chaque ville peut appréhender le concept de *smart city* selon les caractéristiques de son environnement géographique, de sa démographie, de son paysage social et de son économie, pour en sélectionner les aspects les plus importants pour sa situation [Vanin (2019)]. En outre, il n'y a pas de représentation dans l'imaginaire collectif, il n'y a pas de rêve de la *smart city*, rendant difficile sa communication auprès du public, chaque individu ayant alors sa propre vision de la *smart city* [Neuer (2018)]. L'expression *smart city* n'est d'ailleurs pas la seule et il existe aussi des mentions des formes *intelligent city*, *digital city*, *interconnected city* : d'après Albino et al. (2015), il s'agit de formes plus restreintes que l'idée d'une

smart city englobe. Nous utiliserons ici indistinctement l'expression française de *ville intelligente* ou celle anglaise de *smart city* par souci de simplification de la lecture.

Le milieu urbain n'a pas fait défaut dans la révolution des sciences de l'information et a vu son lot de projets lancés autour du *big data* et d'améliorations technologiques qui permettent un gain d'efficacité sur les services produits par une ville, de villes rendues *intelligentes* par l'utilisation d'*intelligence artificielle* et de technologies de l'information et de la communication [57] [Ahvenniemi et al. (2017) et GlobalData (2020)]. La vision générale d'une *smart city* consiste en l'idée d'une ville où l'on améliore certains secteurs bien spécifiques par l'usage de la technologie [Al Nuaimi et al. (2015), H. Kumar et al. (2020) et Monzon (2015)], les secteurs concernés étant généralement ceux du transport, de l'énergie ou les services publics [Ahvenniemi et al. (2017) et Courgnaud (2018)].

Wiig (2015) voit derrière ce mouvement des *smart cities* un mouvement politique plus général de « promotion de l'économie mondialisée. » Sans aller jusqu'à cette analyse, on peut au moins voir dans l'implication de villes dans des programmes de smart city le renforcement du changement de rôle des institutions locales dans les modifications sociétales actuelles et l'évolution des procédures d'aménagement [Wiig (2015)]. Nous dresserons donc ici le portrait de ce que peut être la *smart city* telle qu'elle se déploie avant de nous attarder plus spécifiquement sur ses limites pour mieux en comprendre les implications sur l'urbanisme.

La smart city en pratique

Les innovations imaginées et expérimentées par les villes et leurs partenaires industriels sur la voie de la *smart city* sont multiples. Nous avons mentionné précédemment qu'elles concernent généralement les secteurs du transport, de l'énergie ainsi que les services publics mais elles peuvent toucher tous les secteurs urbains ou être transverses.

De manière générale, il s'agit souvent de récupérer un lot de données sur un objet (par exemple un bâtiment) pour concevoir ensuite un nouveau service ou bien améliorer la performance du-dit objet. Certains auteurs mettent même en avant la possibilité de suivi de l'état de la ville dans son ensemble (par des tableaux d'indicateurs par exemple) [Bisello et al. (2018), Funk et Deininger (2018), T.-h. Kim et al. (2017) et H. Kumar et al. (2020)].

La *smart city* comprend l'amélioration de la performance énergétique [Al Nuaimi et al. (2015) et T.-h. Kim et al. (2017)] et de l'utilisation des ressources naturelles comme l'eau et la nourriture [Al Nuaimi et al. (2015)]. L'exemple le plus parlant reste probablement celui du *smart building*, sorte de prémice à la *smart city* [D. Gonçalves et al. (2020), Hernández U. et al. (2014) et Moussu (2017)]. L'intelligence se décline alors par l'instrumentation du bâtiment et des logements à l'aide de capteurs et d'actionneurs, de panneaux solaires et de batteries qui améliorent l'efficacité énergétique, permettent le contrôle à distance et automatisent une

57. Höjer et Wangel (2015) déplorent que l'intelligence soit alors systématiquement associée à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication. Néanmoins, cette expression étant présente dans le débat public avec cette définition, ils trouvent plus souhaitable de la suivre pour l'affiner et la nuancer plutôt que de « la laisser vouloir tout dire et donc rien » [Höjer et Wangel (2015)].

partie des actions usuelles (ouvrir les volets, allumer la lumière, etc.) [Albino et al. (2015) et T.-h. Kim et al. (2017)]. Parmi les moyens technologiques favorisant l'émergence d'une *smart city*, on parle ainsi beaucoup de l'avénement de l'*Internet of Things* (IoT) et des objets connectés pouvant aller du distributeur automatique à un système complet de feux de circulation « intelligents » [T.-h. Kim et al. (2017)].

Dans le secteur du transport, on trouve des propositions d'amélioration générale des moyens de transport [Al Nuaimi et al. (2015), Albino et al. (2015) et Laconte (2018)], dont les taxis [Bisello et al. (2017)] ou à travers la promotion et l'amélioration de l'efficacité du covoiturage [Bisello et al. (2018)]. Certaines villes préfèrent se concentrer sur l'organisation de la logistique urbaine [Al Nuaimi et al. (2015)] ou bien sur la congestion et le trafic [Funk et Deininger (2018) et T.-h. Kim et al. (2017)], voire sur la structure de leur réseau et de leurs offres de transport public pour en améliorer l'efficacité et mieux relier les destinations des habitants [Albino et al. (2015)].

D'un point de vue économique, l'utilisation de la technologie peut permettre d'élargir l'accès à l'emploi [Funk et Deininger (2018)], de parfaire les synergies d'entreprises notamment dans le secteur de l'isolation ou de la rénovation [Bisello et al. (2017)] ou encore de diversifier l'activité économique de la ville [Monzon (2015)].

Quant aux aspects plus sociaux ou citoyens, la *smart city* espère améliorer la *participation citoyenne* [Albino et al. (2015) et Laconte (2018)], la *gouvernance* [Al Nuaimi et al. (2015)] ou encore la communication notamment sur les performances environnementales de la ville ou du quartier [Bisello et al. (2017)] ; il peut s'agir de perfectionner la *sécurité* et la sureté des citoyens [Al Nuaimi et al. (2015) et T.-h. Kim et al. (2017)] ou bien de travailler à une *meilleure accessibilité* pour les personnes handicapées [T.-h. Kim et al. (2017)]. Certaines propositions mentionnent l'utilisation de l'ensemble des données disponibles sur les habitudes et comportements des citoyens pour *améliorer l'efficacité des services* en général [Funk et Deininger (2018), H. Kumar et al. (2020) et Laconte (2018)] – notamment par l'utilisation des téléphones portables pour les banques [Laconte (2018)] ou pour le transport [Funk et Deininger (2018)] –, et des *services publics* en particulier [Albino et al. (2015) et H. Kumar et al. (2020)] dont la *santé* ou l'*éducation* [Al Nuaimi et al. (2015), Albino et al. (2015) et Laconte (2018)].

Le déploiement de ces mécanismes peut être parfois coûteux (notamment par l'apport initial) pour une commune mais Citizing et OpenCitiz (2017), dans une étude sur cinq projets touchant à la *smart city*, concluent que trois des cinq cas examinés voient un retour sur investissement financier positif et qu'ils sont même quatre projets à avoir une « valeur collective créée par euro public investi » positive sur la période étudiée [Citizing et OpenCitiz (2017)].

Le bilan des propositions pratiques de la *smart city* est donc prometteur, avec une amélioration de l'efficacité de nombreuses dimensions de la vie en ville dans un contexte où les infrastructures sont souvent saturées ou inégalement employées, où le trafic routier pollue l'air à des niveaux dangereux pour la santé humaine, et où les attentes démocratiques sont grandes envers les villes. L'utilisation de la masse de données disponibles permet alors des gains significatifs en accord avec le contexte financier des communes et améliorant la qualité de vie des citoyens.

Cette *smart city* change en partie notre façon de concevoir et de construire la ville et implique des entreprises du numérique pour le déploiement de telles solutions par l'installation de capteurs ou l'analyse de données. Néanmoins, cette forme de ville ne semble pas remettre foncièrement en question l'organisation spatiale des villes, les formes urbaines ou les bâtiments : il s'agit plutôt d'instrumenter, d'ajouter une surcouche aidant à une utilisation *plus efficace*.

Il existe quelques limitations à ces conclusions encourageantes que nous allons voir ci-dessous.

Limites de la smart city

L'acceptabilité sociale d'un tel déploiement de capteurs et de l'intrusion dans la vie privée des citoyens (notamment via les données de réseaux sociaux, de déplacements ou de comportements de consommation), ainsi que l'impact écologique de la construction de ces appareils fortement consommateurs d'énergie et de matériaux rares (voire critiques) de cette smart city peuvent être remis en question. Albino et al. (2015) mentionnent ainsi qu'il est préférable de concevoir des outils technologiques répondant à des besoins des citoyens plutôt que de chercher à faire évoluer leurs habitudes pour correspondre « aux exigences de la technologie » [Albino et al. (2015)]. En soi, le concept de *smart city* rencontre plutôt l'adhésion du public [Schelings et Elsen (2017)] mais celui-ci est plus réticent quant aux implications pratiques que cela peut engendrer, notamment autour de l'usage fait des données mobiles [Julsrud et Krogstad (2020)]. De plus, plusieurs événements récents, comme l'affaire « Facebook - Cambridge Analytica » en 2018, [Kozlowska (2018)], l'établissement du RGPD [58] en 2018 [Houser et Voss (2018)], ou encore l'utilisation d'une application de traçage pour le suivi des malades du COVID-19 en 2020 [AFP et Figaro (2020)] ont conduit les citoyens à s'inquiéter – certes modérément d'après Hinds et al. (2020) – des conséquences de l'extraction et de la vente de ces données personnelles. Malgré les arguments avancés en faveur de leurs propositions, les tentatives d'anonymisation sont parfois ratées et conduisent à la mise à disposition d'informations privées [Boyd et Crawford (2012)]. Les citoyens semblent n'être alors vus, dans un tel cadre, que comme des « *fournisseurs de données* », ignorés dans leur individualité d'après Stiegler [Vanin (2019)] là où des chercheurs appellent à des développements technologiques « *centrés sur le citoyen* » [Sepasgozar et al. (2019)].

Certains invitent également à se méfier de l'influence de la recherche de l'efficacité qui conduit à modifier certes « les conditions de vie mais aussi (…) les façons de penser » [Vanin (2019)]. Certes, les promesses d'amélioration par la technique sont bien suivies dans certains cas d'effets réels, sur des parties réduites ou dans des cadres spécifiques [Neuer (2018)] : par exemple, pour l'automatisation de rames de métro, la gestion de places de parking [59], des réseaux d'eau, des sys-

58. *RGPD* ou Règlement général sur la protection des données.

59. Ce cas est intéressant et illustre bien les possibles : plusieurs startups et entreprises proposent d'utiliser des automates pour faciliter le stationnement de véhicules particuliers, dans l'enceinte d'aéroports par exemple. Stanley Robotics [VINCI Airports (2020)], Skyline, CityLift [Neha (2020)] développent des solutions techniques plus efficaces et pratiques qu'un système classique permettant d'augmenter l'efficacité en termes d'empreinte au sol d'un parking, enjeu capital dans les grandes métropoles où la tension sur le foncier est très importante, particulièrement en Europe. Douillard (2017) stipule que les gains obtenus sont comparables à ceux d'une mutualisation des parkings (c'est-à-dire la possession à plusieurs usagers une seule place) ou

tèmes de covoiturage, etc. L'existence d'un effet rebond dans certaines situations, c'est-à-dire d'une augmentation de la consommation ou de l'utilisation suite à l'amélioration de l'efficacité d'un système ou à la réduction de ses limites, fait cependant douter de l'efficience de la technologie pour résoudre seule la crise environnementale [Emelianoff (2015)].

Ahvenniemi et al. (2017) notent qu'il arrive que le mot *smart city* ne soit utilisé que par mode et marketing sans prise en compte du contexte général dans lequel se déploie une telle approche. Cette forme de surcouche technologique indique que « ce terme [*smart city*] a été revendiqué et défini par les entreprises du numériques, mais [que] ses possibilités sont bien plus larges que simplement d'appliquer une couche de technologies de l'information sur les constructions et analyser les données qui en sont produites [60] » [SOM (2019)]. Les entreprises sollicitées pour le déploiement de telles solutions techniques peuvent avoir intérêt à s'assurer que le débat n'est pas sur la pertinence de cette décision d'instrumenter, de mesurer, de quantifier, mais bien plutôt sur le choix de l'entreprise (ou des entreprises) pouvant réaliser cette *smart city* [Petraud (2018)].

Sans pousser plus loin cette idée, on peut néanmoins remarquer que bien souvent, les compétences techniques des entreprises dépassent largement celles des autorités publiques qui peuvent alors prendre de « mauvaises décisions » ou « être paralysées » face aux offres proposées [Höjer et Wangel (2015)]. De la sorte, les entreprises (les GAFAM en particulier [Taveau (2017)] mais cela s'applique à toutes les grandes entreprises autour du secteur de l'immobilier [Sholla et al. (2017)]) apparaissent nécessairement et légitimement comme les mieux placées pour mettre au point un système technique et technologique d'une ampleur de la taille de villes telles que Montpellier [Carcolse (2014)], Toronto [Deniau (2020)], ou d'autres. Il reste significatif de noter alors que ce sont aux villes d'être choisies par les entreprises et non les entreprises sélectionnées par les villes : ainsi, c'est bien *IBM qui a choisi Montpellier* [Carcolse (2014)], *Amazon qui a choisi Seattle* [61] [Allix (2018)], etc. Il faut donc s'assurer que la technologie déployée reste un moyen au service d'un but, et ce but doit être défini par les citoyens du territoire ou leurs représentants, ou en tout cas ne pas chercher à le supplanter ou à l'éviter. Le paragraphe précédent décrivant les formes de déploiement de la *smart city* l'a souligné : les technologies employées peuvent contribuer à parfaire la démocratie locale et la participation des citoyens à la gouvernance de leur ville [Al Nuaimi et al. (2015), Albino et al. (2015) et Laconte (2018)]. Caglioni (2019) conclut donc que le premier jalon de la *smart city* est peut-être de parvenir à mettre les citoyens au centre du dispositif, d'en faire des « *smart citizens* » dans le contexte actuel [Caglioni (2019)], rejoignant les remarques de Sepasgozar et al. (2019) sur une technologie « centrée sur le citoyen ». Face à l'opposition des habitants et d'experts et suite à la crise du coronavirus en 2020, Google a ainsi

d'un foisonnement du stationnement (c'est-à-dire avoir plus d'abonnés que de places dans un parking partagé) [Douillard (2017)]. D'autres solutions qu'un développement technologique sont donc possibles et on voit bien ici la même distinction entre deux villes *intelligentes*, l'une par la technologie, l'autre par le travail collectif, toutes deux permettant des gains importants par rapport à la situation actuelle. Pourquoi ne pas faire les deux ?

60. « *This term [smart city] has been claimed and defined by tech companies, but its possibilities are so much greater than simply applying a layer of IT over the built environment and mining the data it produces* » [SOM (2019)].

61. En tout cas, c'est l'impression qui ressort quand on étudie le champ lexical et les tournures de phrases employées dans certaines coupures de presse traitant du sujet.

fini par arrêter le projet *Quayside* à Toronto [Deniau (2020)].

Au-delà de la smart city technologique

Dans un premier temps, nous avons vu que la *smart city* ne semblait pas avoir d'impact profond sur la façon dont sont conçues et construites les villes : travaillant par l'ajout de capteurs et la création d'indicateurs, par l'analyse des données des villes, par l'amélioration de l'efficacité technologique dans bien des secteurs, la *smart city* ne modifie pas *a priori* l'urbanisme et ses principes. La technologie peut permettre de mettre plus de démocratie, d'améliorer la réponse surtout techniques des villes vis-à-vis de certains enjeux actuels urgents, et bien sûr d'augmenter leur attractivité dans un monde mettant les territoires en compétition quasi directe. Les grandes entreprises du numérique sont alors, dans ces enjeux d'importance pour les villes, d'une aide précieuse si tant est que l'utilisation de ces nouveaux moyens technologiques n'engloutit pas les élus et les citoyens [Neuer (2018)]. Pour autant, chacun de ces points peut être nuancé [62] et les limites soulignées ci-dessus minorent cette conclusion et soulignent l'existence d'un changement sociétal sous-jacent, mettant en retrait les besoins des habitants au profit de la recherche de performance, privilégiant les aspects de communication ou d'efficacité. L'urbanisme ne se ferait plus alors directement par une puissance publique, dépassée par les progrès technologiques et désireuses de rester dans la course de l'attractivité, mais par le marché. L'équilibre entre la conservation du rôle du public en tant que garant de l'intérêt général et les capacités d'innovation et d'améliorations proposées par le secteur privé n'est pas encore établi.

Les limites de cette forme de *smart city* appellent à en élargir le concept dans une vision que nous allons présenter ci-après.

III.1.c. Vers une ville intelligente par l'intégration globale et le collectif

Plutôt de se concentrer sur les solutions technologiques au besoin d'intelligence des villes, une autre vision de *smart city* met l'accent sur la globalité de la méthode, par la recherche d'une approche holistique et non plus centrée sur un ou deux secteurs. Nous désignons cette nouvelle forme comme la *ville intelligente collective*. Le principe est également d'intégrer dans l'approche de transformation de la ville à la fois les autorités publiques, les entreprises, la technologie déployée et la société dans son ensemble [Ahvenniemi et al. (2017)].

Quelle « nouvelle » intelligence pour une ville ?

On peut commencer par questionner la définition de l'intelligence utilisée par la première forme de *smart city* exposée précédemment. Bergson propose une définition tournée sur sa fonction : l'intelligence permet d'agir sur la matérialité de la vie, d'organiser notre action en prévoyant ses conséquences et ses effets sur le réel et sur la matière. Il est vrai que, pour Bergson, l'intelligence se différencie de

62. Concernant la démocratie par exemple, Neuer (2018) mentionne ainsi que « la démocratie [locale] n'est pas condamnée ; mais elle doit se réinventer et tenir compte de la modification des règles du jeu » [Neuer (2018)]. Si l'on élargit le champ, il existe un pan de la recherche scientifique qui met en avant les risques que font peser aujourd'hui le numérique, Internet et le capitalisme, sur la démocratie [Broad (2013), Miller et Vaccari (2020) et Tenove et al. (2018)].

l'intuition notamment parce qu'elle est plus technique, plus scientifique, là où l'intuition s'appuie sur une proximité avec le réel [Brooks (2020) et Tellier (2011)]. La notion de « *smart* » utilisée dans le cadre des *villes intelligentes collectives* doit s'approcher également de cette définition, en mettant ainsi en avant la capacité d'anticipation dont a besoin une ville vis-à-vis des problèmes pouvant menacer son bon fonctionnement [63] (dont en particulier la crise environnementale, régulièrement associée à la nécessité d'émergence d'une *smart city*) [Vanin (2019)]. On pourra noter, dans le texte de Vanin (2019), les phrases suivantes : « défini par un *ensemble de contraintes* qu'il se doit de surmonter, le projet Smart City prend donc forme dans un processus de créativité maîtrisée », « dans un souci d'économie et de préservation de l'environnement, certains proposent que la ville de demain dispose d'un réseau énergétique *optimal* afin de réduire les gaspillages », et « la *smart city* projette d'offrir des *conditions de vie optimales* ». L'utilisation des termes *contraintes* et *optimal* esquisse les prémices de notre réflexion autour de la pertinence de l'emploi d'un modèle prospective d'optimisation linéaire *sous contraintes*.

L'exercice de planification d'une ville par les autorités en charge de sa gestion et de son développement est donc en soi une expression de l'intelligence d'une ville. En particulier lorsque cette approche s'interroge sur sa place dans le contexte actuel, de ses impacts éventuels, et est pluridisciplinaire, nécessité remarquée sur laquelle insistent plusieurs études [Boisseuil (2018), M. Bonhomme (2013), Geneletti et al. (2017) et J. Gonçalves et al. (2017)].

Une intelligence qui doit se déployer dans tous les domaines

Giffinger et al. (2007) proposent dans une série d'études sur les villes européennes de décomposer les besoins d'intelligence d'une ville en six axes, six critères permettant l'évaluation du niveau d'intelligence (et donc d'établir d'un classement) ou bien six secteurs fondamentaux : économie, gouvernance, mobilité, environnement et énergie durable, habitat, et écocitoyenneté [Giffinger et al. (2007), Giffinger et Gudrun (2010) et IFP Energies Nouvelles (2019)]. Haëntjens, dans son ouvrage *Comment les géants du numérique veulent gouverner nos villes*, préfère n'utiliser que quatre catégories : technique, systémique, politique et culturelle [Neuer (2018)].

Quand on regarde ces classifications, il apparaît que toutes les catégories peuvent être améliorées avec la technologie comme elles peuvent l'être sans y avoir recours [64]. On peut en outre y voir la « synthèse des problèmes de l'humanité » [Vanin (2019)].

63. Cette idée de capacité et de tentative d'anticipation est à différencier de la *résilience*, également associée à l'avenir des villes [Broulard (2020), Liu et Song (2020), Talandier (2019) et Toubin et al. (2012)]. La résilience « désigne la capacité d'un système à atténuer les chocs passés ou futurs » [Talandier (2019)]. L'intelligence telle que nous la considérons ici permet et englobe une forme de résilience. Néanmoins, anticiper, préparer l'action, agir sur la projection que nous voulons faire de l'objet urbain est plus global et plus vaste que de prévoir une réponse à des crises.

64. L'exemple précédent de l'amélioration des parkings décrite dans la note 59 de la page 41 est une bonne illustration de l'alternative, la méthode *parking partagé* et celle *robotisation* ayant des résultats similaires en gains [Douillard (2017)].

De la nécessité de la durabilité et conclusion

La *ville intelligente collective* telle que nous la présentons ici sera nécessairement durable [65] [Ahvenniemi et al. (2017)], par la prise en compte de son avenir, des enjeux dans lesquels doivent s'insérer ses choix d'aménagement et ses transformations politiques ou sociales, et du bien être de ses habitants,

La ville du futur, qu'elle aspire à être une *smart city* ouvertement ou non, peut et doit en outre se faire par incrémentation, par évolutions successives [Vanin (2019)]. De la même façon que la ville durable était un mouvement plus qu'un état, une dynamique plutôt qu'une vision statique, la ville intelligente n'est pas une création imaginaire parfaite, optimale qui sortirait de terre. La vision de l'évolution de la ville doit s'inscrire dans un territoire, dans un réel, dans une matérialité, dans un récit historique, dans les attentes et la dynamique d'une population, même dans une situation aussi spécifique que celle d'une zone s'ouvrant à l'urbanisation avec des aspirations ambitieuses. Ce besoin d'une vision et d'un développement cohérent à l'échelle d'une ville ou d'un ensemble plus large peut justifier l'intervention d'une collectivité territoriale, par opposition à une prise de décision par des acteurs privés uniquement, mais nécessite dans tous les cas une approche globale et une politique sur tout le territoire. La prospective est une approche pertinente pour répondre à ces enjeux de la ville future comme nous allons le voir ci-dessous.

III.2. La proposition de la prospective

Face à ces enjeux complexes et à ces trois propositions (*smart*, *durable*, *intelligente collective*), la discipline prospective est une approche pertinente en ce qu'elle est dans la définition d'actions et dans l'approfondissement de notre vision du futur des villes. Comme nous l'avons souligné dans la section III.1, la *ville durable* est avant tout une démarche, une dynamique et une mise en action, qu'elle choisisse d'être durable, intelligente ou les deux [Hassan et Lee (2015)], ce qui correspond très bien à la philosophie prospective. La *smart city* n'est *a priori* pas une approche similaire mais peut également s'intégrer dans une évaluation prospective de la cohérence avec le projet politique ou sociétal de développement des villes, en particulier quand on voit la *smart city* non pas comme un assemblage de solutions technologiques à des problèmes distincts mais comme une transformation globale de la conception et du fonctionnement des villes.

III.2.a. L'humain habite passé, présent et futur

Avant de détailler ce que nous entendons ici par prospective, faisons tout d'abord une très brève excursion dans le domaine de la philosophie pour souligner quelques points sur la notion du temps : car il s'agit bien de cela finalement, de notre relation au présent (les besoins actuels), au passé (la continuité, les tributs de l'histoire) et à l'avenir (qu'y voulons-nous ? et comment y parvenir ?). Lorsque l'on se penche sur la philosophie occidentale du temps, on fait face à de grands noms de la pensée des derniers millénaires : Épicure, Spinoza, Descartes, Bergson

65. « *Ultimately, a city that is not sustainable is not really "smart"* » [Ahvenniemi et al. (2017)].

pour ne citer qu'eux [Comte-Sponville (2010)] et le propos de ce document n'est pas d'établir une analyse comparée de ces auteurs mais simplement d'extraire quelques éléments de cette littérature pour appuyer notre proposition.

Est-ce que le rapport au temps est semblable pour une communauté et un individu ? On peut noter tout d'abord que les échelles de temps sont différentes alors que les enjeux sont similaires : la communauté cherche, consciemment ou non, à rester, à être pérenne, à dépasser ses membres, comme l'individu s'inquiète de sa survie. Le temps de l'individu est de quelques années ou décennies là où celui d'une ville ou d'un pays est *a priori* bien plus long. Pour autant, bien souvent, l'avenir de la communauté passe par des décisions individuelles (gouvernants, représentants, mandataires, etc.) qui peuvent parfois être influencées par un objectif personnel et non collectif, tendant alors à confondre les deux durées [Meyer (2015)]. En outre, les humains formant le collectif peuvent refuser un changement trop lent et souhaiter voir l'évolution « *de leur vivant* » même s'il y a généralement plutôt une forme d'inertie dans la prise de décision en groupe. La question de responsabilité sur les générations futures peut intervenir, comme dans le cas de la définition de la ville durable [66].

L'intelligence humaine, ainsi que Bergson le met en évidence, commence par regarder en arrière. En s'appuyant sur la mémoire de ce qui a été, de ce que nous avons déjà rencontré, vécu, ressenti, fait, nous analysons les événements se produisant et tentons d'adapter notre action [Tellier (2011)]. L'intelligence se concentre sur les souvenirs mais également sur les idées et la logique de ce qu'il se produit dans l'instant et c'est ce dialogue entre la mémoire et l'analyse du moment qui produisent l'action. Cette façon de voir les choses s'applique aux événements du quotidien [67] mais peut également être utilisée pour décrire la prise de décision à des échelles de durée plus longues.

III.2.b. Le passé comme appui de la conception urbaine

L'étude du passé est capitale pour la construction du futur et les leçons que nous pouvons tirer de *ce qui a été* nous est nécessaire pour choisir *ce qui sera*, et fait donc partie de la construction de notre capacité d'action dans le présent. Illustrons ce principe par quelques exemples plus concrets dans le domaine de l'aménagement.

Le Schéma de Cohérence Territoriale [68] (ou SCoT) de l'aire métropolitaine bordelaise s'appuie par exemple sur l'histoire de la structure urbaine et de la dynamique foncière de la région pour construire ses orientations en procédant notamment à une analyse de la demande en logements [Schoenmakers et al. (2007)].

L'archéogéographie est une discipline parfois mise à contribution dans la réflexion urbaine : certains chercheurs tentent de tirer des leçons sur les construc-

66. Voir la section III.1.a du présent chapitre, p. 33.

67. On peut prendre un exemple du quotidien pour illustrer ce principe. En voyant une voiture s'avancer vers moi au passage piéton, je ne tente pas d'en vérifier le modèle ou la plaque d'immatriculation, je réfléchis plutôt à la vitesse de la voiture en intégrant son évolution temporelle proche, mon esprit forme une appréciation du temps qu'elle mettra à arriver au passage piéton en s'appuyant sur mes expériences précédentes tandis que mon regard essaie de capter celui du conducteur ou de la conductrice. De la sorte, j'en conclus si je peux traverser en toute sécurité.

68. On pourra se reporter à la section IV.1 pour plus d'informations sur les documents de référence encadrant l'urbanisme en France.

tions sociales, architecturales et urbaines à partir d'études du passé d'un territoire. Cette approche a été notamment appliquée à la métropole de Bordeaux : les travaux de Lavigne (2011), sur le secteur nord mais également les « boulevards et barrières » de la ville, sont un exemple caractéristique de ce que cette discipline apporte en compréhension de la ville d'aujourd'hui. L'auteur établit très clairement dès le début du document que le but de l'étude est de « situer [les projets de la Direction de l'Aménagement] par rapport à une vision de longue durée de l'histoire des lieux et des milieux. » La compulsation de cartes et de recherches historiques permettent finalement à l'auteur de produire des « préconisations » pour l'aménagement du territoire bordelais, notamment vis-à-vis des risques d'inondation en faisant une critique approfondie du Plan de Prévention du Risque d'Inondation ou encore par un plan directeur d'aménagement des axes routiers et d'implantation de bâtiments en suivant les logiques archéogéographiques des quartiers étudiés [Lavigne (2011)].

Le travail de Choay (1979) autour de l'histoire des modèles de l'urbanisme est également un élément intéressant pour mieux comprendre les dynamiques qui ont été à l'œuvre jusque-là dans la conception urbaine mais également sur les limites de l'urbanisme en tant que discipline pratique et en tant que science opérationnelle [69] et donc, *a fortiori*, sur les limites de notre approche en tant que rapprochement d'autres sciences telles que la modélisation mathématique et prospective de l'urbanisme [Choay (1979)].

Reclus (1881) livre, dans sa *Nouvelle Géographie Universelle* de 1881, une description de la ville et de ses environs, mentionnant par exemple qu'elle « semble trop vaste pour ses habitants », expliquant les raisons de la construction des bassins à flots à la fin du XIX^{ème} siècle par le peu de fond de la Garonne au niveau de Bordeaux qui rendait parfois compliquée l'amarrage de larges bâteaux, décrivant les transformations effectuées par les Bordelais sur les cours d'eau et les marais, insistant sur le caractère industriel de la ville. On peut constater que Bordeaux s'appuie encore aujourd'hui sur ses vignes et la qualité de son vin, qu'elle reste une des grandes villes de France, tant par sa place économique et démographique que culturelle. L'étude de tels textes historiques aident ainsi à mieux comprendre l'identité de la ville et complètent l'approche géographique de Lavigne (2011) [Reclus (1881)].

III.2.c. La prospective, moyen d'action pour construire le futur

Définir la prospective est un exercice aussi ardu que définir n'importe quelle notion polysémique et utilisée par un grand nombre de personnes. Néanmoins, il est possible de s'appuyer sur plusieurs penseurs, en particulier Gaston Berger, considéré comme le précurseur et l'inventeur de la prospective telle qu'elle est travaillée et réfléchie en France [Mousli (2013)]. Sa définition est difficilement réductible à une phrase mais on peut toutefois utiliser ses propres mots comme base : aussi, la prospective « *est une réflexion sur l'avenir, qui s'applique à en décrire les structures les plus générales et qui voudrait dégager les éléments d'une méthode applicable à notre monde en accélération.* »

69. Choay (1979) écrit ainsi que « l'idée même d'un urbanisme scientifique est un des mythes de la société industrielle » ou encore que « la science du réel n'est qu'un garde-fou de l'imaginaire ; elle ne constitue pas un fondement qui permette d'éliminer l'arbitraire » [Choay (1979)].

La prospective, ni rétrospective, ni prévision

La prospective est une étude du futur et elle a d'ailleurs souvent été confondue avec *la prévision*. Même si les deux exercices étudient toutes deux le futur, il faut opérer une distinction fondamentale sur les futurs qu'elles construisent. La prévision *impose* le futur par des marches descendantes qu'une forme de gravité socio-économique nous force à descendre (ou bien que des lois physiques, climatiques, environnementales nous obligent à emprunter dans le cas de modèles météorologiques par exemple). La prospective quant à elle nous propose plutôt de regarder plus loin, la direction que nous souhaitons prendre et, de là, de construire la trajectoire qui y mène. Les deux approches sont donc nécessaires : pour prendre de bonnes décisions, il faut à la fois s'assurer qu'elles ne causent pas de catastrophes immédiates, d'injustices insupportables compromettant un plan plus général, et en même temps qu'elles nous emmènent dans la direction visée.

De même, il est possible de rapprocher les démarches rétrospective et prospective pour définir en creux la seconde à partir de la première. Ces deux attitudes peuvent sembler symétriques : toutes deux se projettent hors du présent, la première vers le passé et la seconde vers le futur ; toutes deux tentent d'apprendre quelque chose pour notre présent. Néanmoins, il reste ici aussi une différence fondamentale : la rétrospective ne peut que regarder et chercher à comprendre le passé, elle ne peut nullement agir sur celui-ci, elle renseigne donc sur ce qui *s'est déroulé* mais ne dit rien sur *ce qui se déroulera* ; la prospective ne nous dit pas non plus ce qui se déroulera (ce serait se voiler la face que de croire à cette possibilité) mais elle propose d'agir pour construire un certain futur. Il s'agit donc bien ici de mener à une action et non d'une étude théorique. À nouveau, la prospective se nourrit de la rétrospective puisque la connaissance du passé aide à éviter des écueils, peut approfondir la réflexion et élargit l'imagination.

On retrouve ici l'analyse bergsonienne du présent (*cf.* plus haut section III.2.a) comme prolongation du passé mais aussi d'une recherche de l'action, du choix pour le futur. Toutefois, Bergson propose que la conscience humaine utilise le passé et la mémoire pour cette projection vers l'avant là où la prospective, tout en s'appuyant nécessairement sur les mêmes mécanismes de réflexion humaine, va s'adjoindre d'autres outils face à la complexité des systèmes en jeu.

De la pensée de Gaston Berger et de Pierre Massé (commissaire au plan de 1959 à 1966), on peut retirer une autre information capitale caractérisant les exigences de la prospective, la notion d'*accélération* : « *Notre civilisation est comparable à une voiture qui roule de plus en plus vite sur une route inconnue lorsque la nuit est tombée. Il faut que ses phares portent de plus en plus loin si l'on veut éviter la catastrophe.* » Abondamment étudiée par Rosa et Chaumont (2015), l'accélération est une des caractéristiques de notre société et peut engendrer des « formes d'aliénation sévères » des individus [Rosa et Chaumont (2015)]. Or, l'accélération du présent peut conduire à un désintérêt pour le temps long de demain mettant alors en péril la *durabilité* des choix, ce qui est d'autant plus inquiétant face aux enjeux actuels.

La création de scénarios ancrés localement

La prospective peut en outre être caractérisée par la construction de scénarios contrastés [Hatem (2004)]. Ces scénarios sont bien souvent créatifs, puisant dans les ressources de l'imagination. On peut ici retrouver à nouveau la trace des travaux de Bergson en ce que le langage a plusieurs fonctions, dont celles de « *penser la matière* » et « *d'opérer sur elle* ». La mise en place des mots et d'une ressource linguistique sur un futur envisageable (voire envisagé) fait partie intégrante de l'être humain et de sa relation au présent et à la durée. Bien qu'en réduisant, qu'en figeant le sens des choses et des idées en utilisant des mots – bien moins dynamiques que l'esprit puisqu'ancrés dans la matière d'après Bergson – cela nous est nécessaire pour agir sur la matière [Tellier (2011)]. La création de ces scénarios n'est pas résumable à un exercice consistant à laisser libre cours à son imagination pour des résultats cherchant l'originalité [70] mais un travail de prise-en-compte des enjeux du secteur considéré (en contactant des experts et en utilisant une revue de la littérature sur le sujet).

Il faut garder à l'esprit que comme le modélisateur est biaisé par ses *a priori* sur les futurs possibles, et donc les scénarios testables, le prospectiviste est influencé par ses biais cognitifs. C'est pourquoi il est très fréquent dans les deux situations de s'adosser à la littérature scientifique et à ceux qu'on appelle communément des experts du domaine considéré afin d'élargir autant que possible la diversité des éléments modélisés et la variété des cas étudiés.

III.2.d. Du besoin de cadre pratique et d'outils

Face aux enjeux impliquant une modification de nos villes et donc de l'urbanisme, vus dans la section II, nous avons présenté la démarche prospective qui correspond aux attentes (la figure 1.16 résume l'avancée de la construction de notre proposition). Il nous faut encore montrer comment l'insérer au mieux dans les méthodes actuelles d'aménagement, la prochaine section présentant donc le fonctionnement pratique de la conception urbaine en France (section IV), et choisir les outils adéquats (section V), avant la présentation de la problématique (section VI).

70. En regardant le projet BM2050 – ou Bordeaux Métropole 2050 –, il est possible de constater que les idées de projets pour 2050 établis par la métropole n'ont pas cherchés à sembler réaliste de prime abord. Le but de cet exercice mis en place par une mission spécialement mandatée par le maire de la métropole n'était pas prospectif mais cherchait plutôt à sonder la population sur la façon dont les habitants concevaient le futur de leur territoire, particulièrement suite aux changements importants survenus à Bordeaux pendant les dernières décennies et face à l'importance grandissante de la question écologique et de *sustainability* (au sens extrêmement général du terme).

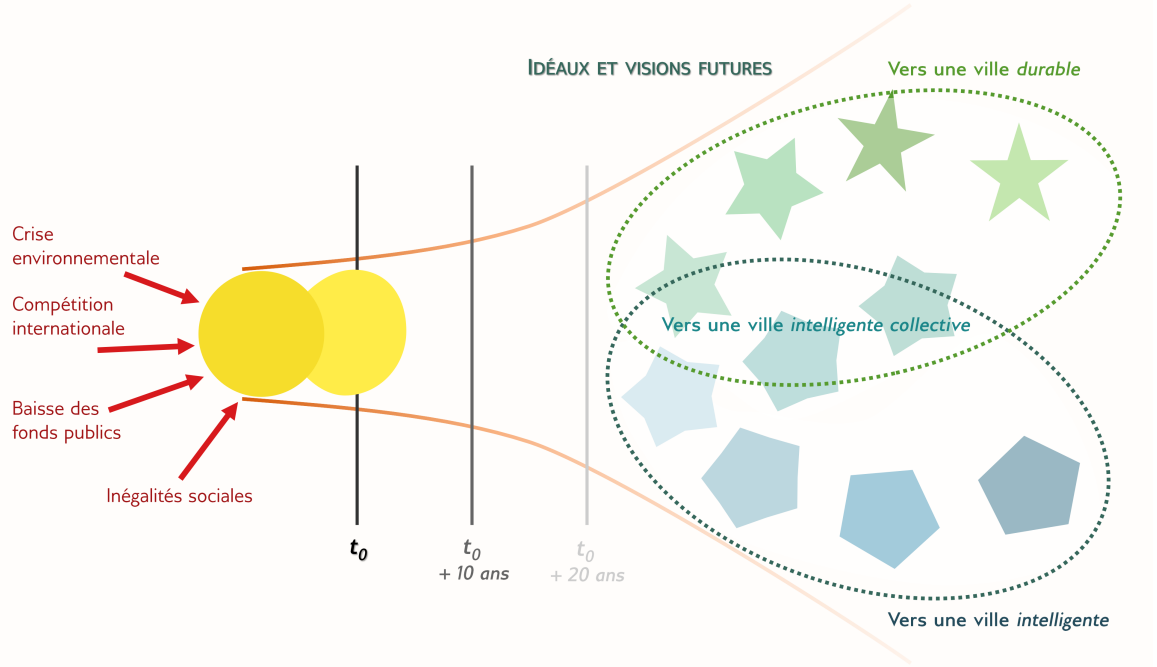


FIGURE 1.16 – Résumé du contexte : la section précédente a décrit les visions futures de villes pour répondre aux enjeux actuels, qui sont finalement plutôt des trajectoires que des objectifs précis.

IV. L'aménagement urbain

Cette section décrit le fonctionnement de l'aménagement en France, dans ses grandes lignes actuelles mais aussi face aux changements importants survenus au cours des dernières décennies avec l'émergence des concours *Réinventer*, la baisse de la puissance financière des collectivités territoriales, et la crise climatique. De la sorte, nous plaçons notre proposition de recherche plus pertinemment la discipline de l'urbanisme mais aussi face aux limites ou aux avantages du cadre réglementaire et institutionnel français actuel. L'illustration de ces problématiques par l'étude plus précise de la question de la densité soulignera enfin l'importance d'une approche long-terme globale.

IV.1. Le fonctionnement de l'aménagement en France

IV.1.a. Entre théorie et pratique, le vestige de la planification centrale

Plusieurs notions principales émergent quand on parle d'aménagement urbain : une *organisation de l'espace*, une *échelle*, une *action publique* et une *pratique*. L'aménagement cherche ainsi avant tout à *organiser spatialement* les éléments d'un territoire, bâtiments, infrastructures, équipements [GÉOCONFLUENCES (2019) et VILMIN (2015)] voire même habitants ou activités [JACQUOT (2005)]. La *taille de ce territoire* varie et il peut ainsi exister plusieurs niveaux d'aménagement selon DE JACQUELOT et al. (2001), en partant de la *politique urbaine* jusqu'à la *réalisation pratique* en passant par les pilotages *politique* et *technique* [DE JACQUELOT et al. (2001)]. Cette action est *publique* au sens où elle est faite par une autorité locale (municipa-

lité ou intercommunalité), directement ou par un mandataire [Géoconfluences (2019)]. Enfin, il faut insister sur la notion d'action ou de *pratique d'aménagement* [Jacquot (2005)] mais il existe un débat sur la place épistémologique de cette discipline qui oscille entre « science », « pratique », « technique », entre « recherche et action », entre portée « analytique et normative » [Collectif Champ Libre (2018)].

L'aménagement se fait à travers trois acteurs (physiques ou moraux) capitaux, formant un « triptyque maîtrise d'ouvrage-maîtrise d'œuvre-maîtrise d'usage », qui se répartissent entre organisme décideur du principe général et choix du ou des réalisateurs, organisme responsable de la conception et de la réalisation, et entités ou personnes qui par l'usage qu'ils font du lieu, du bâtiment, du quartier, poursuivent la démarche de construction [Rode (2017)]. Parmi les innombrables métiers qui interviennent dans ces longs processus se trouve notamment celui d'aménageur. Cette profession est finalement assez récente dans sa formalisation d'après Rousseau et Vauzeilles (1995) ce qui pourrait expliquer le flou autour du placement de la discipline dans les domaines universitaires mais aussi entre « théorie et pratique »[71].

L'aménagement urbain est nécessairement pluridisciplinaire puisqu'il regroupe plusieurs des enjeux des villes : économie (l'accent étant mis sur l'emploi), transports, logement, santé, éducation, environnement, etc. Il conduit à l'obtention d'un objet physique, visible, dont « les résultats sont exposés au grand jour », d'un espace organisé et construit [Arab (2007) et Rousseau et Vauzeilles (1995)].

Cette idée d'organisation des villes remonte à l'Antiquité pour les civilisations égyptienne, mésopotamienne, harappéenne, grecque et romaine, voire même avant pour la civilisation chinoise, puisqu'il a depuis très longtemps fallu organiser la croissance des villes, planifier les équipements publics nécessaires (aménités, écoles, routes, etc.) et en gérer le fonctionnement [Wikipedia (2020)]. L'urbanisme a bien évolué au cours des siècles pour aboutir à sa forme actuelle en Europe et en France. On peut dire que « la planification spatiale s'est installée durant les Trente Glorieuses comme *mode d'intervention constitutif de l'État* au nom de l'aménagement du territoire national »[Behar (2017)]. Du point de vue contemporain, il peut donc être vu en France comme une forme de « *nostalgie d'un despotisme éclairé* » et d'une planification pyramidale découlant d'une vision stratégique forte venant de la tête de l'État [Estèbe (2016)]. On assiste tout de même depuis peu à des évolutions majeures dans le déroulement de ces idées, dans « *le contexte, les enjeux et les conditions de l'action urbaine* » [Arab (2007)].

Pour résumer, par aménagement urbain, nous désignons la discipline à la fois théorique et pratique grâce à laquelle sont organisées des portions de territoire d'une ville entre les activités inhérentes au bon fonctionnement de celle-ci. Cet aménagement est pour l'instant fait par la puissance publique mais peut être délégué par mandat à d'autres acteurs, ce que nous verrons dans les parties suivantes.

71. Il est littéralement indiqué, dans l'article de Rousseau et Vauzeilles (1995), « *au confluent de la théorie et de la pratique* », ce qui n'est pas sans rappeler la devise de l'École des Mines de Paris, « *théorie et pratique* », établissement au sein duquel a été préparé cette thèse de doctorat.

IV.1.b. Règlements principaux

Maintenant établie la définition de l'aménagement, nous allons pouvoir plonger briévement dans le monde des documents réglementaires d'urbanisme, rempli de sigles et d'acronymes. La question qui nous intéresse ici est de déterminer comment se construit la vision planificatrice, et sur quels textes, quels documents ou quels acteurs s'appuie la stratégie territoriale [72].

Il existe plusieurs modalités et plusieurs degrés d'implication d'une ville dans l'aménagement de son territoire. Le premier outil auquel on pense lorsque l'on traite de la question de l'aménagement est le Plan Local d'Urbanisme (ou **PLU**). Il s'agit du principal document de planification d'urbanisme au niveau communal, qui a remplacé le Plan d'Occupation des Sols depuis la loi relative à la solidarité et au renouvellement urbain du 13 décembre 2000, dite « loi SRU » (certaines communes rurales n'en n'ont pas mais suivent une réglementation nationale d'urbanisme, aussi appelée RNU). Ce texte doit être en accord avec le code de l'urbanisme et doit également être décliné à l'échelle intercommunale [73] (sous la forme d'un **PLUi**) lorsque la situation s'y prête (c'est une obligation sauf si une proportion suffisamment importante des communes de l'intercommunalité s'y opposent). Le PLU est composé de plusieurs parties : un rapport de présentation (contenant notamment un diagnostic territorial), le projet d'aménagement et de développement durables (aussi appelé **PADD**), des orientations d'aménagement et de programmation, un zonage et un règlement. En plus du PLU (ou du PLUi), un plan climat-air-énergie territorial (ou **PCAET**) est obligatoire pour tout EPCI de plus de 20 000 habitants et doit décliner les engagements régionaux et nationaux au plan local.

D'autres documents sont importants à des échelles plus larges. Le Schéma de Cohérence Territorial (ou SCoT) est ainsi un outil de conception et de mise en œuvre d'une planification stratégique intercommunale, à l'échelle d'un large bassin de vie ou d'une aire urbaine, dans le cadre d'un projet d'aménagement et de développement durables (PADD). De plus, les villes s'inscrivent dans une région disposant normalement d'un schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (ou **SRADDET**, anciennement **SRCAE**). L'annexe B présente succinctement les documents réglementaires de la métropole bordelaise.

IV.1.c. Formes d'aménagement

En pratique, l'aménagement urbain peut suivre plusieurs procédures, chacune impliquant un dispositif institutionnel et juridique plus ou moins complexe.

72. La majeure partie des informations décrites dans cette section proviennent du cours « *Acteurs et outils du projet urbain* » donné par Manon Loisel au *Conservatoire National des Arts et Métiers* dans le cadre de l'enseignement *Urbanisme et population* entre janvier et juin 2018.

73. Par intercommunalité, on entend ici toutes les formes allant de la communauté de communes – la plus petite – à la métropole – la plus importante. Celles-ci sont généralement rassemblées sous la forme administrative et juridique de l'établissement public de coopération intercommunale (appelé **EPCI**). Il existe d'autres formes de *coopérations* intercommunales, par exemple par la mise en place d'un Syndicat mixte (qui peut regrouper d'autres acteurs publics locaux comme les chambres consulaires).

L'aménagement réglementé

La forme majoritaire est finalement celle qui consiste à construire des maisons individuelles sur des terrains achetés par des personnes physiques ou morales. Il s'agit d'aménagement *diffus*. Cette forme est dite réglémentée car soumise au PLU et plus particulièrement aux Orientations d'Aménagement et de Programmation (OAP). La gestion se fait alors par la délivrance de permis de construire et par le marché. Il n'y a pas de procédure particulière pour la ville en dehors de la définition d'un PLU et d'OAP qui soient en adéquation avec sa stratégie d'aménagement.

Le PLU doit respecter la hiérarchie des normes et donc en particulier les textes de lois fixant des exigences environnementales à l'échelle nationale. Il peut réguler l'emprise au sol et la taille des bâtiments, la performance énergétique du neuf et de l'existant, ou encore protéger certains éléments naturels (de la zone à l'arbre ou à la haie). Les agences d'urbanisme publiques éditent parfois des documents exposant les contraintes du PLU [Mairie de Paris (2018)]. La prise en compte des réglements relatifs à l'environnement étant complexe, elles publient également des aides pour l'élaboration d'un PLU [ARS et A'Urba (2015)]. Les concertations qui peuvent avoir lieu pour l'élaboration de ce texte laissent enfin la place à la prise en compte des enjeux susmentionnés – si c'est bien là la volonté de la collectivité concernée [Guéranger et Poupeau (2007)]. C'est donc un outil adapté pour la mise en place de contraintes fortes relatives à l'environnement ou aux inégalités sociales mais sa conception et sa révision sont complexes comme en témoigne la figure 1.17.

L'aménagement encadré

Cette deuxième forme d'aménagement, dite encadrée, est généralement faite sous l'égide d'un *établissement public local* (**EPL**) – qui en porte donc le risque. On trouve principalement deux procédures de planification possibles, les lotissements [74] et les Zones d'Aménagement Concerté (ou **ZAC**). Les ZAC sont une procédure permettant à la collectivité publique ou à l'entité publique ayant mandat d'aménager ou de faire aménager un territoire. Généralement, la ville maîtrise les territoires qu'elle pourra céder par la suite à d'autres acteurs publics ou privés. Cette question de la possession du foncier est d'ailleurs capitale dans ce genre d'opération et sans elle l'opération est plus délicate, la collectivité ne pouvant plus mettre en place un projet complet (en particulier dans le cas d'intégration de propositions ambitieuses sur les enjeux environnementaux et sociaux) sur le territoire considéré sans l'accord des propriétaires. Existe depuis la loi du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique ou loi *ELAN*, la possibilité de mettre en place une ZAC à *maîtrise foncière partielle* pour gérer ce genre de situation en passant par d'autres moyens qui restent plus complexes que les cas de maîtrise foncière totale [Groupe Monassier (2019) et Laffitte (2020)]. Le coût du foncier à Bordeaux, comme dans toute métropole, est élevé et cette situation est renforcée par le fait qu'il est très peu contrôlé par la ville ou la métropole, celles-ci n'ayant choisi que récemment – à l'échelle de temps de l'urbanisme – de mettre en place une réelle politique foncière (par la rentrée de la métropole dans l'établissement public foncier régional

74. Forme parlante d'elle-même contrairement à la ZAC.

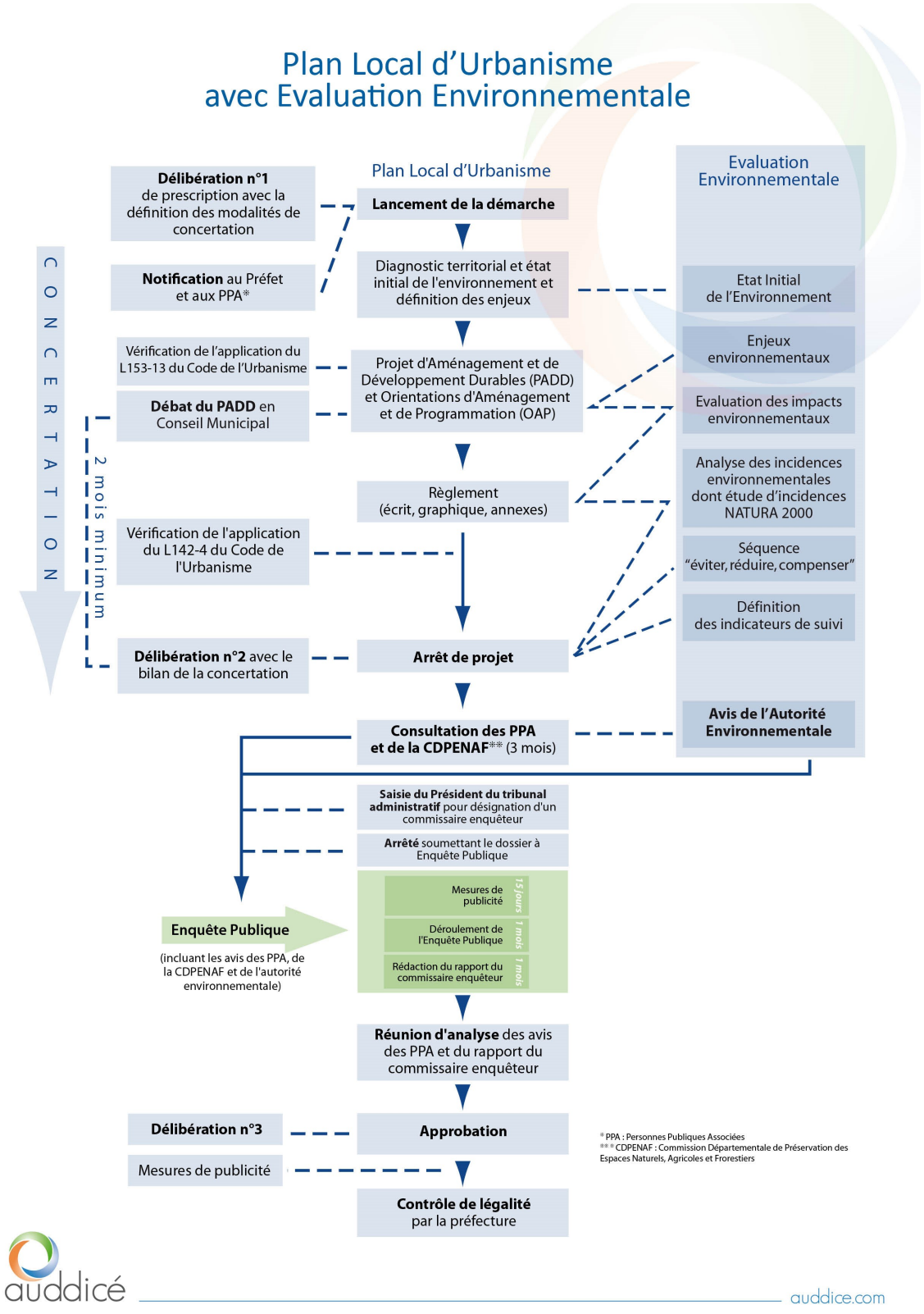


FIGURE 1.17 – Schéma de la conception ou la révision d'un PLU avec évaluation environnementale (source : auddicé).

par exemple) [Hirschberger et al. (2018)].

Figure 1.18 – Plan guide du quartier des Bassins à Flot de Bordeaux réalisé par ANMA (source : ANMA).

Un exemple de situation complexe dans l'aménagement qui montre l'importance du jeu d'acteurs et de la transformation progressive de l'aménagement est celui des Bassins à Flots à Bordeaux. Il s'agit d'un quartier qui abritait une base sous-marine [75] et les bassins à flots de réparation de bateaux de la ville. Ce quartier a fini par être abandonné au sens où sa fonction première n'était plus, les bassins à flot ayant été désaffectés au cours des années 70 et 80. La ville a donc profité de l'arrêt de son activité économique pour en changer le visage et l'usage [Ballereau et al. (2014)] : face à l'engorgement de la rocade et à l'augmentation de la demande en logement (et donc des prix) des villes du centre (Bordeaux mais aussi Pessac, Talence, etc.), il semblait nécessaire de trouver de la place pour un autre quartier accessible depuis le centre, notamment en transports en commun. Il se trouve que la ligne de tramway B passe par le quartier des Bassins à Flot depuis 2008 [Wikipédia (2020i)] ce qui permet en 2009 le lancement du projet d'aménagement de la zone [Wikipédia (2020b)]. Le foncier des Bassins à Flots est morcelé entre beaucoup d'acteurs privés différents ce qui rendait très compliquée la mise en place d'une ZAC et son pilotage par la commune lors du lancement du projet au début du XXI^{ème} siècle. Cela a conduit les autorités, en concertation avec l'urbaniste chargé de superviser l'aménagement, Nicolas Michelin, à créer des ateliers réunissant les parties prenantes (élus, services de la collectivité, entreprises, mais aussi citoyens et associations). Ces ateliers ont grandement facilité la mise en place de règles suivant la vision globale du quartier de l'urbaniste malgré un surcroît de travail pour l'organisation des ateliers et leurs conséquences [Wikipédia (2020b)]. Ces ateliers n'ont toutefois pas été parfaitement équitables en termes

75. Cette base sous-marine a été construire par les Allemands entre 1941 et 1943 alors qu'ils occupaient la ville et n'a plus été utilisée depuis.

de poids entre acteurs publics et privés [Hirschberger et al. (2018)].

On constate donc les limites d'un cas où le foncier n'est pas complètement maîtrisé par une entité publique (commune, intercommunalité, région, État, etc.) ou en tout cas le besoin plus important de nouer des partenariats public-privé, besoin créé intentionnellement par le législateur [76] [Laffitte (2020)]. Dans le cas plus classique de la ZAC, la collectivité a en outre l'avantage de voir les risques de l'opération portés par l'EPL.

L'aménagement maîtrisé

Ce n'est pas le cas dans cette dernière forme d'aménagement où la collectivité endosse tous les risques : juridiques, fianciers, politiques, etc. En internalisant l'aménagement (nous allons voir dans la section suivante comment cela peut se faire), la ville se donne certes plus de pouvoir en quelque sorte, en facilitant les démarches d'expropriation par exemple, mais elle se place alors dans une situation plus vulnérable. C'est une procédure plus rare pour la plupart des communes de taille plus modeste. Cela reste toutefois un ressort intéressant pour les métropoles, comme celle du Grand Paris, qui doivent faire face à une pression plus importante sur leur foncier [Baltzer (2018)].

IV.1.d. Acteurs institutionnels

La section précédente a présenté les principales procédures d'aménagement qui existent en France et souligné notamment l'importance de la maîtrise du foncier dans le cas des ZAC. Les acteurs ont également un rôle important à jouer dans la façon dont l'aménagement se fait. Comme mentionné dans la section IV.1, les tâches d'un projet d'aménagement sont réparties entre trois entités principales, la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'usage. En pratique, cette dernière n'a pas de rôle formel mais plutôt une influence *de fait* sur l'aménagement du territoire [Rode (2017)]. Nous allons donc décliner plus spécifiquement les rôles et relations des deux autres maîtrises mentionnées.

La maîtrise d'ouvrage

La *maîtrise d'ouvrage* (**MOA**) est généralement entre les mains de l'intercommunalité (qui a plus de moyens techniques et financiers pour superviser et mener des projets d'ampleur) ou de l'État (notamment dans le cas des *opérations d'intérêt national* [77]). Le maître d'ouvrage est l'entité *pour laquelle* est réalisé le projet, le commanditaire, ou encore celle en charge de la définition de ses objectifs, de son cahier des charges et des grandes lignes de sa réalisation.

76. Notamment face à la raréfaction des dotations des communes comme le suggère Angles (2012) ou comme en témoigne un maire dans un rapport de la cour des comptes sur les risques des partenariats public-privé pour les collectivités territoriales [Angles (2012) et Cour des comptes (2015)]

77. La définition donnée par Wikipédia (2020j) est la suivante : « une opération d'intérêt national (OIN) est, en France, une opération d'urbanisme à laquelle s'applique un régime juridique particulier en raison de son intérêt majeur. L'État conserve dans ces zones la maîtrise de la politique d'urbanisme ».

La maîtrise d'œuvre

La MOA fait ensuite appel à un *maître d'œuvre* (**MOE**) qui va *faire pour elle*. Dans le cas des projets publics d'aménagement urbain, il existe deux formes principales de MOE, la *société d'économie mixte* (**SEM**) ou la *société publique locale* (**SPL**). La SEM est une société anonyme (SA) créée par une collectivité locale disposant de plusieurs actionnaires dont les agents publics mais aussi des acteurs privés. Par construction, les SEM ne peuvent travailler que sur des projets *d'intérêt général* mais sans limite géographique. De son côté, la SPL est entièrement détenue par un rassemblement d'au moins deux collectivités territoriales et ne peut agir que sur le territoire des communes qui la possédent. Il existe enfin plusieurs moyens pour une MOA de faire appel à sa MOE, plus ou moins risqués financièrement, plus ou moins directs : la régie, le mandat ou la concession. En prenant la MOE en régie, la collectivité s'assure d'un contrôle direct par une internalisation de la gestion du projet d'aménagement. Cela demande toutefois de disposer de services techniques capables de concevoir et de gérer de tels projets tout en faisant peser le risque économique du chantier sur la ville ou l'EPCI [78] directement. Si la MOA donne mandat à une autre entité pour la MOE, la collectivité s'assure de garder une forme de tutelle sur le projet, c'est-à-dire de rester MOE, tout en évitant de porter l'intégralité des dossiers en interne. Enfin, la concession consiste à déléguer complètement le projet à la société choisie. La société en charge de la MOE peut également faire appel à des entreprises pour une *Assistance à Maîtrise d'œuvre* (AMO) comme des bureaux techniques, agences d'urbanistes, etc. La MOE étant en charge de la conception et de la réalisation du projet, elle propose donc des solutions pratiques à la MOA – en cherchant à respecter le cahier des charges fourni par celle-ci pour faire accepter le projet –, les adapte aux besoins de celle-ci et en suit le chantier une fois une version arrêtée.

Par aménageur, on entend donc souvent la MOE. Son rôle est capital comme on vient de le voir et c'est elle notamment qui a la charge du *bilan de l'opération*, c'est-à-dire de l'équilibre financier de l'opération, et s'assure de n'être ni déficitaire ni excédentaire. Il s'agit là du principal outil de pilotage et l'aménageur aura à cœur de s'assurer que les éléments « *qui coûtent mais rapportent peu* » (écoles, parkings souterrains, bâtiments culturels…) sont contrebalancés par d'autres « *qui rapportent* » (logements privés, locaux pour le tertiaire…) par les taxes et impôts locaux.

IV.1.e. La délicate question de la maîtrise du foncier

Nous avons vu précédemment que la procédure employée dépendait à la fois de l'échelle du projet (maison individuelle, quartier ou lotissement), de la capacité de prise de risques de la collectivité mais aussi de la maîtrise totale ou partielle du foncier. Dans le cas des Bassins à flots par exemple, la métropole ne possédant pas le foncier a préféré fonctionner par ateliers plutôt qu'en appliquant une ZAC. Cet exemple paraît anodin et semble rendre la possession des terrains par une entité publique superflue mais la maîtrise du foncier est véritablement une des clés de la mise au point et du déploiement d'une politique d'aménagement cohérente à l'échelle du territoire de la collectivité. En particulier dans le cas de grande

78. *EPCI* ou établissement public de coopération intercommunale.

intercommunalité comme une métropole, qui plus est attractive et avec des coûts de terrains au m² très élevés, il devient de plus en plus difficile pour une autorité publique telle que Bordeaux Métropole d'acheter de nouvelles surfaces.

Or il se trouve que si la collectivité locale, en tant qu'entité *a priori* démocratiquement représentative des habitants de son territoire, n'a pas de poids économique, n'a pas le contrôle des terrains et donc des projets pouvant être menés autrement que par les règlements présentés précédemment, elle ne peut pas complètement concevoir et appliquer une politique d'aménagement. La métropole doit alors trouver d'autres moyens de piloter les changements urbains. Ces nouveaux enjeux auxquels doivent faire face les villes dans leur développement s'ajoutent à une transformation plus large qui touche architecture et urbanisme.

Pour conclure cette première partie, on voit donc que l'urbanisme est soumis à un cadre réglementaire strict, que ce soit par le Plan Local d'Urbanisme ou la mise en place de Zones d'Aménagement Concerté, qui laisse assez peu de place actuellement à l'innovation ou aux changements radicaux appelés par les formes de villes futures présentées précédemment. De plus, ces politiques nécessitent d'avoir une vision globale du territoire, que ce soit pour la construction du PLU ou l'intégration d'une ZAC dans son environnement direct.

IV.2. De grands changements dans la profession

L'ultra-libéralisme des dernières décennies, la mondialisation, la construction européenne économique, la baisse des dotations publiques [Armengaud (2016)], la baisse de la puissance économique de l'État et des entités publiques (collectivités territoriales, agences publiques…), la tension grandissante sur les espaces libres, la grogne face à l'impact de l'urbanisation sur l'environnement [Amouriaux (2020) et Barroux (2019)], tous ces facteurs contribuent finalement à transformer drastiquement l'organisation de la profession de l'urbanisme aujourd'hui. S'ajoutent à ces enjeux actuels une forme de désenchantement : les travaux des *Trente Glorieuses* ont vieilli, centrales nucléaires comme grands ensembles, et sont devenus des objets abîmés dont la méthode de construction par planification ne semble par conséquent plus si attractive. On constate de plus un « effritement des croyances dans le futur » et en notre capacité à « maîtriser les conséquences » de nos actions [Estèbe (2016)].

En réponse à ces transformations sociétales et à ces pressions supplémentaires, l'urbanisme, tant du côté des autorités publiques que des entreprises, a cherché et trouvé quelques propositions différentes pour continuer à faire évoluer les milieux urbains. Parmi celles-ci, on peut souligner la création des concours « *Réinventer* », lancés par la ville de Paris et sa métropole, ainsi que la réorganisation de la chaîne de production des logements. La conception de la ville est plus largement marquée par un retrait des autorités publiques et par une implication croissante d'entreprises privées [79]. Nous concluerons enfin cette section en décrivant en quoi ces changements ouvrent une place pour un exercice de modélisation prospective à l'échelle métropolitaine.

79. Ce changement est visible dans de nombreux pays occidentaux mais ne prend pas les mêmes formes et ne se traduit pas de la même façon partout [Bourdin (2008a)].

IV.2.a. État des lieux

Nous avons présenté dans la partie précédente les méthodes de planification ainsi que les différents acteurs intervenant dans l'aménagement aujourd'hui. La situation n'a pas toujours été comme ça et les changements qui se produisent aujourd'hui sont bien souvent la continuité ou tout du moins la poursuite de tendances remontant à la fin du XX^{ème} siècle. Orillard (2018) met ainsi en évidence trois périodes dans la conception urbaine depuis les années 50 : une première où le privé est principalement impliqué dans les procédures par le contrôle de SEM ou des collectivités territoriales ; à partir de la crise économique des années 70, l'État renforce la place du secteur public dans la direction des SEM mais donne en même temps une place plus importante à la sous-traitance et à des montages avec une présence accrue des entreprises ; enfin, depuis les années 2000, les tâches ont été plus clairement séparées dans le pilotage des ZAC et les partenariats public-privé ont contribué à donner plus de poids au privé dans la production d'équipements. De plus, l'apparition de « *nouveaux types d'équipements privés* » liés à la révolution numérique renforce l'importance des entreprises dans le développement urbain. On constate donc que public et privé coopérent au moins depuis les années 50 pour « *produire la ville* » [Orillard (2018)]. Dans le domaine de l'architecture, on assiste également à la fin du XX^{ème} à la mise en avant des *starchitectes*, et à l'idée de projets architecturaux majeurs et transformants [Greco et al. (2018)] [80]. La puissance publique n'est donc plus seule aux commandes du développement urbain et a même perdu du poids de négociation [Füzesséry (2010)]. D'après Alain Bourdin, on assiste à la fin de l'urbanisme libéral au moment de la crise de 2008 environ [Füzesséry (2010)].

Ce mouvement peut être mis en relation avec deux points, la fin de vie des bâtiments construits dans les années 70 déjà mentionnée plus haut, et, en France notamment, avec le passage d'une économie secondaire à une économie plus tertiaire et financiarisée. Cette transition a conduit à l'abandon d'un grand nombre de sites industriels qui ont été désertés [Bourdin (2008a)]. Sont donc apparues de nouvelles formes d'urbanisme comme l'urbanisme *alternatif* ou *temporaire* voire *tactique* qui redéfinissent notamment le rapport aux friches, aux terrains inoccupés et à l'occupation illégale. Il s'agit souvent de rassembler des artistes, des jeunes professionnels ou professionnelles, des associations, etc., pour s'installer dans des bâtiments laissés à l'abandon ou bien entre deux propriétaires ou chantiers (ces temps de transition durant parfois plusieurs années) [81]. Les collectifs s'installent et lancent des activités sociales, artistiques voire fêtardes pour marquer la rupture avec l'*occupation traditionnelle* des lieux, véhiculant une image plutôt positive de l'occupation et encourageant les autorités à un laisser-faire. Ces formes alternatives d'aménagement urbain sont souvent à l'initiative de jeunes diplômés et diplômées, particulièrement issus du monde de l'architecture ou de l'urbanisme [Monnot et Berri (2018)]. Les friches ne sont pas uniquement laissées entre les mains de ces regroupements spontanés : la capacité d'une ville à transformer son paysage industriel et à réinvestir les anciennes usines ou vieux hangars peut témoigner d'un dynamisme et d'une attractivité économique dans

80. On peut rapprocher ces principes de l'effet Guggenheim décrit plus longuement dans l'annexe A, p. 367.

81. On peut citer par exemple les Grands Voisins, dans l'hôpital Saint Vincent de Paul, ou encore le « bar » Ground Control, tous deux à Paris [Monnot et Berri (2018)].

la concurrence que se livrent les communes [Bourdin (2008a)]. Elles permettent aussi de tester de nouveaux modes de vie ou de nouvelles organisations idéologiquement radicalement différentes, qui peuvent contribuer à faire face à la crise environnementale et aux ruptures sociales [Armengaud (2016)].

IV.2.b. Nouvelles méthodes de planification et d'organisation

Suite à ces tendances, de nouveaux modèles apparaissent, parfois concurrents. En particulier, deux propositions institutionnelles sont venues en appui des collectivités, les *établissements publics fonciers*, qui ont pour rôle de « fluidifier le fonctionnement du marché en recyclant le foncier mobilisable et en le cédant prêt à l'emploi », et les *organismes fonciers solidaires*, qui peuvent disposer du foncier et faire un bail long terme avec des propriétaires pour la construction de logements (plus abordables puisque sans le coût du terrain) [Baltzer (2018)].

Les entreprises aussi ont leurs innovations à proposer : la start-up HabX tente par exemple de changer la chaîne de production des logements en recueillant les envies des potentiels propriétaires pour proposer aux promoteurs des plans *optimaux*, c'est-à-dire dont les appartements seront tous achetés [Coletto (2017)]. Derrière cette proposition, l'entreprise suggère de « repenser le logement en termes d'usages (…) et non (…) de normes et de règles » [Ta ninga (2017)].

La transformation la plus flagrante est peut-être la place croissante de l'appel à projets dans la conception urbaine aujourd'hui [Baltzer (2018)]. Sous la forme d'*Appel à Projets Innovants* (ou API), les concours *Réinventer* fonctionnent sur le principe suivant : la ville ou l'intercommunalité dispose de terrains qu'elle présente dans un appel à projets, chaque terrain étant accompagné de plus ou moins de contraintes (minimum de logements, équipements obligatoires, etc.) et d'une intention plus ou moins claire (sur l'activité) ; des équipes multi-professionnelles se forment pour répondre en rassemblant des promoteurs (disposant des fonds et du pouvoir d'investissement), des architectes et urbanistes, des entreprises, des associations ou autres acteurs locaux, et des usagers potentiels. Une fois les projets proposés, la collectivité locale sélectionne le projet gagnant pour chaque lieu et vend le terrain au promoteur porteur du projet.

La force de cette procédure est notamment de constituer dès la conception un regroupement d'acteurs pour réfléchir à la programmation du quartier [Greco et al. (2018)]. De plus, elle permet normalement d'accélérer les phases de conception, la collectivité donnant généralement carte blanche presque totale aux porteurs de projets [Meunier et al. (2018)]. Elle présente également la « programmation [au sens de l'assignation des lieux à des fonctions] comme une démarche » et non comme des formules magiques ou de simples effets de mode [Meunier et al. (2018)]. Füzesséry (2010) va même plus loin en insistant sur le besoin de considérer l'urbanisme non pas « comme une opération » mais « *comme une fonction* » dans la société.

Il apparaît en outre que l'intégration de la population dans la gestion et la conception de solutions est souvent souhaitable pour un grand nombre des enjeux cités (espaces naturels, modes de déplacement…) [Orsenna et Gilsoul (2018)]. Orsenna et Gilsoul (2018) notent même l'existence d'un « *urbanisme en open-*

source ».

IV.2.c. L'évolution du rôle des institutions publiques

On assiste en fait depuis une décennie à une réflexion autour de la place des collectivités territoriales et de leurs émanations sur leur territoire [Baraud-Serfaty et al. (2018)]. En symétrique, c'est le rôle des acteurs privés qui est questionné par les nouvelles procédures déployées [Orillard (2018)]. Les entreprises, en particulier dans le domaine de la construction mais aussi du numérique, s'intéressent de plus en plus à la conception urbaine [Sabbah (2005)]. Il a ainsi été parfois difficile « *d'aligner les intérêts de toutes les parties* » au sein des projets sélectionnés pour les sites de la métropole du Grand Paris [Le Renard (2018)]. En même temps, les entreprises offrent des possibilités dont ne disposaient pas forcément les autorités locales, comme un traitement de données pour de la prévision des besoins des habitants [Ta ninga (2017)], ce qui conduit alors parfois à ce que les collectivités territoriales et même les instances de l'État soient dépassées en connaissances et en compétences par les acteurs privés [Höjer et Wangel (2015)].

Les services publics peuvent être mis en concurrence ou remplacés par des « *offres privées* » : la conservation des principes du service public, « *égalité, continuité et mutabilité* » paraît pourtant souhaitable pour tous les services urbains, qu'ils soient publics ou privés [Baraud-Serfaty et al. (2018)]. Le PLU conserve néanmoins une place importante dans la politique foncière de la collectivité : la commune continue de porter les responsabilités du développement urbain et de tout ce qu'il implique pour faire une « *ville durable, inclusive et pérenne.* » Le PLU en est « *nécessaire mais pas suffisant* » [Baltzer (2018)]. La question de l'environnement en ville, en particulier au regard des enjeux sanitaires de pollution de l'air et plus largement des conséquences de l'étalement urbain [Corburn (2007) et Frumkin (2002)], ne peut être réglé par une simple « *transformation verte* » du paysage urbain, *i.e.* par l'ajout de végétation (ce qui est du ressort du PLU) [82] [P. Kumar et al. (2019)]. La problématique générale de l'occupation des sols est en effet capitale et englobe plus largement d'autres préoccupations légitimes ayant trait aux transports, aux dangers climatiques, à l'impact des constructions, à la concurrence entre usages, à la dépendance d'une ville à ses territoires environnants…qui sont hors du rôle du PLU mais restent entre les mains de la collectivité territoriale.

IV.2.d. Limites de ces approches

Il existe donc plusieurs limites aux approches présentées ci-dessus : une forme de standardisation des innovations qui donnent un aspect uniforme à une bonne partie des projets soumis et peuvent conduire à un manque d'adéquation entre les propositions et les besoins des territoires ; un manque de contrôle sur l'intérêt public de certaines formes suggérées ; et un risque de gentrification qui exacerberait les inégalités sociales.

82. Cariolet et al. (2018) proposent ainsi trois leviers pour améliorer la résilience d'une ville face à la pollution de l'air : la baisse de la production des particules nocives – ce qui correspond plutôt à une politique de transports –, la baisse de la concentration et la baisse de l'exposition [Cariolet et al. (2018)].

Tendance à la standardisation

On assiste à une forme de « *surenchère programmatique* » lorsque, pour se démarquer des autres propositions, les équipes tentant de trouver des « *propositions inédites* » mettant en évidence la qualité de leur proposition [Greco et al. (2018)]. Il est souvent difficile pour la ville d'évaluer la réelle pertinence et l'adéquation avec les besoins de sa population des propositions de programmes faites par certaines équipes [Meunier et al. (2018)] mais ces dernières « sont (...) 40 % à affirmer que la programmation proposée découle directement d'une demande de la collectivité » [Greco et al. (2018)]. Une des limites de ces API est en outre qu'ils conduisent les promoteurs et autres investisseurs à chercher la *solution idéale* réplicable partout, qui incluerait par exemple « culture du "projet" », « ville durable » et « "concertation" publique » pour être au goût du jour [Füzesséry (2010)], au point que ces « pratiques collaboratives » remplacent parfois le travail de scientifiques sur la ville et sa construction (sociologues, urbanistes, etc.). Les logiques de marché sont donc tout de même à l'œuvre, même dans de tels concours [Meunier et al. (2018)], et on revient finalement assez vite à une normalisation des propositions voire à une forme classique de maîtrise d'œuvre pour les propositions d'urbanisme alternatif [Monnot et Berri (2018)]. La standardisation d'un procédé ne pose pas de problème en soi, pour éviter par exemple des inégalités territoriales. Elle peut cependant pousser à faire des propositions « *parce que cela se vend* », ce qui risque de diminuer la pertinence des résultats construits par l'API. On parle ainsi parfois de *green washing* pour désigner le rajout d'éléments de verdure hors sol ou bien d'*innovation washing* pour les nouvelles formes d'usages proposées [Meunier et al. (2018)].

Quelle place pour l'intérêt public ?

Plus largement derrière cette idée que des projets « innovants », presque normés, sont proposés sur plusieurs sites sans toujours considérer le contexte local spécifique, se trouve la question de la place de l'intérêt public dans ces changements de procédures et de la capacité des villes à y veiller. Des mécanismes ont été mis en place, notamment au sein des contrats de cessation des terrains des appels à projets, afin de s'assurer que les vainqueurs des lots respectent au moins la programmation qui leur a valu leur victoire [Le Renard (2018)]. Les villes ont cependant conservé leurs rôles même dans ce contexte de changement de paradigme de la conception urbaine et ont donc toujours pour tâche de « déchiffrer (...) une demande sociale (...) en matière de mobilité, d'accessibilité, de solidarité, d'ambiances ou encore de qualité de vie », de s'assurer du respect de droits urbains comme la « liberté d'expression », le « droit au logement », le droit au travail mais aussi de formes de droits plus récentes comme le « droit à l'accueil, à la mobilité, à un environnement satisfaisant et à la sécurité » [Füzesséry (2010)].

Les approches précédemment mentionnées ne devraient pas mettre en danger ces principes au risque de produire des villes inadaptées et inhabitables. Les groupements privés pouvant finalement remplacer l'aménageur public [83], il paraîtrait surprenant que ces principes soient *a priori* respectés sans l'action de la collectivité, les objectifs des acteurs privés étant par nature différents voire

83. Dont, on le rappelle, l'objectif était l'obtention d'un bilan économique équilibré (voir section IV.1.d du présent, p. 55).

contradictoires avec ceux-ci [Meunier et al. (2018)]. Les autorités locales, *a contrario*, et en particulier les services municipaux (donc non soumis aux élections et au besoin de réélection), ont une mission de service public et sont plus à même de s'intéresser aux questions de durabilité et de pertinence pour les évolutions futures de la ville.

Greco et al. (2018) demande ainsi directement, « qui sera désormais chargé et capable de porter une attention et de répondre aux besoins des territoires et de leurs habitants ? » Et plus généralement, on peut questionner le fait que les API ou les nouvelles formes d'urbanisme collectif et alternatif respectent l'intérêt public. *A contrario*, une autre procédure serait purement démocratique avec la consultation des citoyens sur tous les aspects. Sans même questionner la faisabilité d'une telle méthode, aucun des deux extrêmes ne semble tout à fait pertinent : ni la décision de l'autorité publique sans consultation des citoyens, ni la construction seule des citoyens [Monnot et Berri (2018)]. Les deux acteurs ont leur rôle à jouer, en tant que garant du respect des droits mentionnés précédemment pour l'un, en tant que lanceurs de dynamique, que constructeurs d'alternatives pour les autres. La bonne synthèse de cette discussion est fournie par Meunier et al. (2018) qui insiste sur la nécessité d'une concertation et d'une co-construction des politiques et actions, à l'image de ce qu'ont montré les « politiques et actions environnementales », avec un accent mis sur la transparence de la prise des décisions.

Risques de gentrification

Que ce soient les API ou les formes plus originales d'urbanisme, certains mentionnent un fort risque de gentrification [Le Renard (2018) et Monnot et Berri (2018)]. La *gentrification* [84] est un concept aux définitions flous, rassemblant selon certains « *tous les processus par lesquels, dans un quartier plutôt central, une population plus riche remplace une population plus pauvre, en produisant un renchérissement des valeurs immobilières* », selon d'autres « *la gentrification produit (…) des paysages urbains que peuvent "consommer" les classes moyennes et moyennes supérieures (…) et qui contribuent à la formation d'identités de classe.* » Bourdin (2008a) questionne la pertinence de ces définitions et souligne la diversité des visages des transformations de quartiers et des déplacements de populations : selon lui, il n'y a pas systématiquement ce remplacement tout comme le départ des populations plus pauvres n'est pas nécessairement une défaite pour celles-ci. Il met l'accent sur le caractère problématique des logements d'arrivée de ces personnes [Bourdin (2008a)]. En ne produisant qu'une réflexion locale, par projets, les API ou l'occupation des friches industrielles n'abordent pas ce problème et il s'agit probablement là du symptôme qui émerge d'un manque plus profond de cohérence territoriale globale que ne peuvent fournir ces nouvelles procédures.

84. Le mot « *gentrification* » en lui-même vient de l'anglais.

IV.3. La densité comme caractéristique urbaine emblématique

La question de la densité est une problématique majeure et emblématique de nombreux débats autour de la construction de la ville : le choix d'intensifier ou non la densité des milieux urbains intègre une large partie des enjeux environnementaux, sanitaires, économiques et sociaux auxquels doivent faire face les villes aujourd'hui. Est-elle bonne ou mauvaise ? « *Dans la conscience collective, l'idée même de densité n'a pas très bonne presse, souvent associée à des images négatives de promiscuité, de concentration, de surpeuplement ou de verticalité.* » [Adam et Moulinié (2005a)] Faut-il densifier, dédensifier ? Probablement un peu des deux, mais où, quand, comment ?

La Charte d'Athènes, célèbre document de 1933 [85] rassemblant 95 propositions sur la planification et la conception urbaines, recommande par exemple les règles suivantes : « *affranchissement des édifices par rapport à la rue, suppression du parcellaire, net allégement de l'emprise au sol, construction d'immeubles de grande hauteur* », c'est-à-dire une diminution de la densité bâtie et de l'emprise des bâtiments en même temps qu'une augmentation de la hauteur de ceux-ci. Ces conclusions d'un groupe d'architectes de la première moitié du XX^{ème} siècle sont certes datées bien que toujours utilisées, citées et critiquées par la profession [Gintrand (2020)]. Elles recoupent donc bien des enjeux qui restent actuels.

La dynamique de la ville a très souvent été entrainée, au cours de son histoire, vers une densification. Quand on regarde plus précisément l'histoire de France depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, on constate ainsi que les villes et plus particulièrement les grandes villes ont eu une croissance soutenue due à un exode rural marqué jusqu'en 1968. La fin des Trente Glorieuses et la nouvelle économie qui émerge à la fin du XX^{ème} siècle conduisent ensuite à une décroissance légère des centres-villes denses et à une croissance de la périurbanisation. On assiste en même temps à de nouvelles migrations vers les zones rurales, particulièrement dans l'ouest et le sud de la France, non plus liées à des motivations économiques mais plutôt à une recherche d'un environnement plus agréable [Talandier et al. (2016)].

Face aux enjeux récents de consommation d'énergie et d'impact environnemental, en particulier au regard des problématiques d'artificialisation des sols, la densification semble être une des solutions pour diminuer l'empreinte écologique des villes et de leurs habitants tout en absorbant la croissance démographique urbaine [86] [Banque mondiale (2010a)]. Afin de se pencher plus précisément sur

85. Ce document reste très controversé, même près d'un siècle après. Les propositions faites cherchaient à s'assurer que la ville répondra aux besoins de l'homme selon quatre axes, vie, travail, loisirs et transport. La Charte d'Athènes est particulièrement connue, en France en tout cas, comme inspiration du principe de zonage [Brausch (2016)].

86. Ce n'est pas sans rappeler les questionnements de Rey (2014), qui, par sa réflexion sur la *taille des choses*, suggère que les villes, comme toutes les constructions naturelles ou humaines – ou très probablement la plupart –, ont une *bonne* taille. Une bonne taille est une taille optimale au-dessus de laquelle le système perd en efficacité par sa trop grande étendue malgré les gains d'échelle et par l'apparition de nouveaux problèmes, et en-dessous de laquelle le système en tant qu'ensemble perd en dépenses d'énergies individuelles [Orsenna et Gilsoul (2018) et Rey (2014)]. Il ne serait alors pas judicieux d'augmenter indéfiniment la taille d'une ville, même en densifiant, mais c'est là un débat politique plus large sur la décentralisation et notamment la place de Paris dans le paysage français des villes, opposition qui a fait couler beaucoup d'encre [Marchand (2001)].

cette problématique, il convient d'abord de définir et de parvenir à caractériser la ou plutôt *les densités*.

IV.3.a. Les différents types de densité

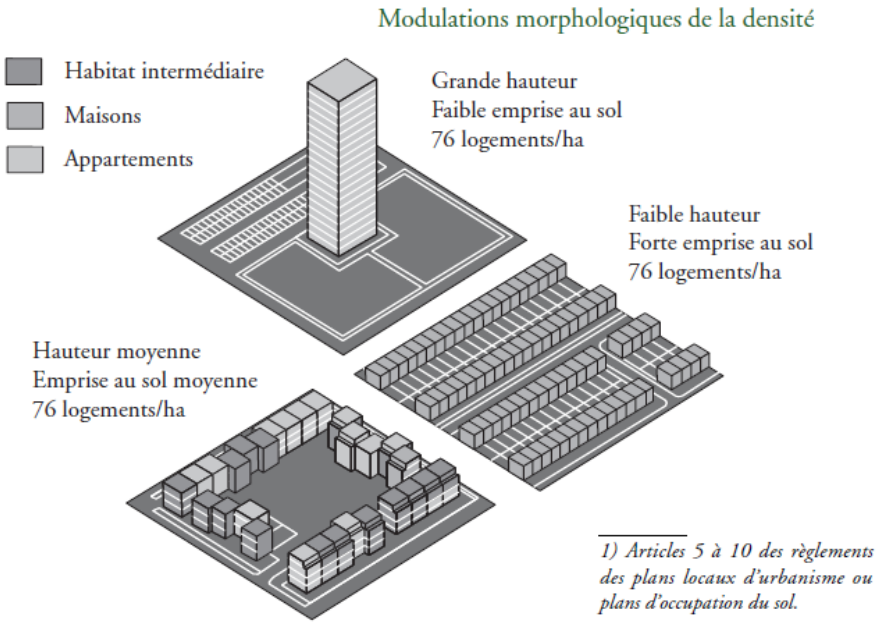


FIGURE 1.19 – Variation de morphologie pour le même Coefficient d'Occupation des Sols (source : ADAM et MOULINIÉ (2005a)).

Il existe en fait plusieurs densités distinctes qu'il ne faut pas confondre [87] [ADAM et MOULINIÉ (2005a, 2005b, 2005c)].

- Une densité d'occupation des sols, généralement mesurée par le *Coefficient d'Occupation des Sols* ou COS. Celui-ci, très lié au *droit à bâtir*, est le rapport entre les surfaces habitables (donc tous les étages et pas seulement l'emprise au sol) et la surface de terrain [88]. Quand on observe le COS à différentes échelles, on obtient des informations différentes : à l'échelle d'un *quartier*, la valeur nous donne une idée de la relation entre espaces privés et espaces publics ; au niveau de l'*îlot*, cela renseigne plutôt sur la morphologie urbaine ; tandis que sur une *parcelle*, c'est bien le coefficient officiel utilisé dans la construction, les documents publics et les plans locaux d'urbanisme qui renseigne sur la densité du terrain [M. BONHOMME (2013)]. Une même valeur de COS peut donc être traduite par beaucoup de morphologies différentes comme présenté dans l'image 1.19. On notera que le COS peut être supérieur à 1.
- Une densité bâtie, associée au *Coefficient d'Emprise au Sol* ou CES, qui reflète peut-être un peu mieux la *perception* que l'on peut avoir d'une densité sur un plan. Le CES est simplement calculé par le rapport de l'emprise au sol du bâti sur la surface de l'îlot. On distingue :

87. Les définitions suivantes sont largement inspirées des travaux de ADAM et MOULINIÉ (2005a) sauf indication contraire.

88. Le COS était auparavant calculé différemment : on a utilisé les *surfaces hors œuvre nette* (SHON) et *brute* (SHOB), la surface de plancher SDP…

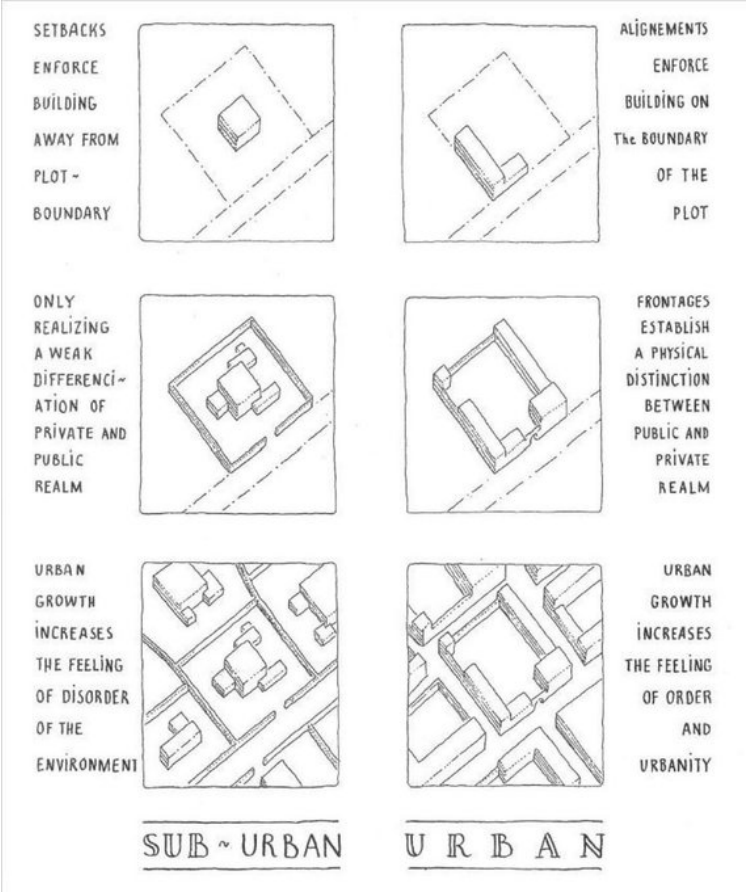


FIGURE 1.20 – Comparaison de deux quartiers présentant une densité d'emprise au sol comparable mais fournissant deux paysages urbains bien distincts (source : KRIER (1996)).

  - Une densité bâtie brute qui prend en compte tout le territoire
  - Une densité bâtie nette qui ne considère que « *emprise du bâti, espaces libres à l'intérieur de la parcelle ou de l'îlot, [et] voies de desserte interne* ».
- Une densité de population, d'activité ou d'emplois : pour une commune, pour un IRIS, rapportée aux superficies occupées par le logement. On a ainsi les définitions de plusieurs facteurs :
  - $\text{densité}_{\text{pop}} = \frac{\text{population}}{\text{surface}}$
  - $\text{densité}_{\text{résidentielle}} = \frac{\text{nb de logements}}{\text{surface}}$
  - $\text{densité}_{\text{emplois}} = \frac{\text{nb d'emplois}}{\text{surface}}$
  - $\text{densité}_{\text{activité}} = \frac{\text{nb d'emplois + nb d'habitants}}{\text{surface}}$
- Une densité végétale
- Une densité perçue par les habitants : dépend de la luminosité, des espaces naturels et d'autres critères qualitatifs (par exemple, les grands ensembles paraissent denses alors qu'ils le sont moins que les centres car les populations y habitant ont souvent été forcées d'y vivre). Une étude de l'APUR, 2003, trouve ainsi que, à Paris, « *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)* » [APUR (2003)].

KRIER (1996) propose une visualisation intéressante (voir figure 1.20) de ce qu'une

même densité de bâti peut donner dans deux situations qu'il décrit comme « *sub-urbaine* » et « *urbaine* » [Krier (1996)]. On y remarque que la forme urbaine n'est pas uniquement liée à la densité bâtie.

Il apparaît ainsi bien que cette problématique est en fait à l'intersection de nombreuses autres thématiques : la qualité de vie, les techniques de construction, l'attractivité économique, l'utilisation des sols, la biodiversité, la mobilité, le coût des services publics, etc.

IV.3.b. La densité, enjeu central du développement urbain

Bonne ou mauvaise densité : la question de l'évaluation de la « qualité » de la densité est particulièrement récurrente dans la littérature autour de la ville, que ce soit de la part de scientifiques [Ali-Toudert et Mayer (2006), Amado et al. (2016), Ciccone et Hall (1993), Gudipudi et al. (2016), Güneralp et al. (2017), Larivière et Lafrance (1999), Newling (1969) et Shammin et al. (2010)], d'urbanistes, d'entreprises ou même de collectivités locales et de journalistes [Alter (2014), Boyko (2014), Randall-Texas A&M (2017) et Thyssenkrupp Elevatoro (2016)]. Une illustration un peu amusante de l'incertitude autour de ce sujet peut venir de deux articles publiés sur le même site à quelques années d'intervalle et qui portent comme titres deux conclusions qui semblent opposées (bien que le détail des articles s'appuie sur deux études distinctes concentrées sur certains points précis) : « *Why Bigger Cities Are Greener* » [Florida (2012)] vs « *When Density Isn't Greener* » [Bliss (2017)].

L'histoire semble avoir suivi deux mouvements contraires : l'exode rural a conduit à une croissance des villes et à une densification importante des zones périurbaines [Talandier et al. (2016)], tandis que les tendances plus récentes ont vu (*cf.* figure 1.21) une simplification et une dé-densification (tours, maisons pavillonnaires), détériorant les performances énergétiques d'après Salat, 2011, cité par M. Bonhomme (2013) dans sa thèse de doctorat. Les centres historiques sont quant à eux plutôt denses par rapport aux zones périurbaines (à l'instar de celui de Paris visible sur la figure 1.21), et généralement adaptés aux conditions climatiques locales car s'étant construits sur la durée.

Mise en relation de la densité avec le monde périurbain

La question de la densité renvoie à celle du périurbain : à dynamique de population égale, si la densité n'augmente pas, c'est nécessairement la surface au sol utilisée qui doit croître conduisant à un étalement urbain ou à l'urbanisation de zones plus importantes.

Le périurbain peut être défini comme les quartiers discontinus et éloignés entourant une ville ; l'INSEE spécifie en outre dans sa définition du périurbain l'idée qu'au moins 40 % de sa population résidente est employé dans la ou les villes proches. Le périurbain, qui prend de nombreux visages en France et se décline en plusieurs définitions [Géoconfluences (2013)], peut également être considéré comme un territoire qui doit soit être densifié soit s'agrandir pour faire face aux limites de centres généralement déjà saturés ou protégés par leurs caractéristiques historiques. Cette interprétation met en jeu la dynamique et les

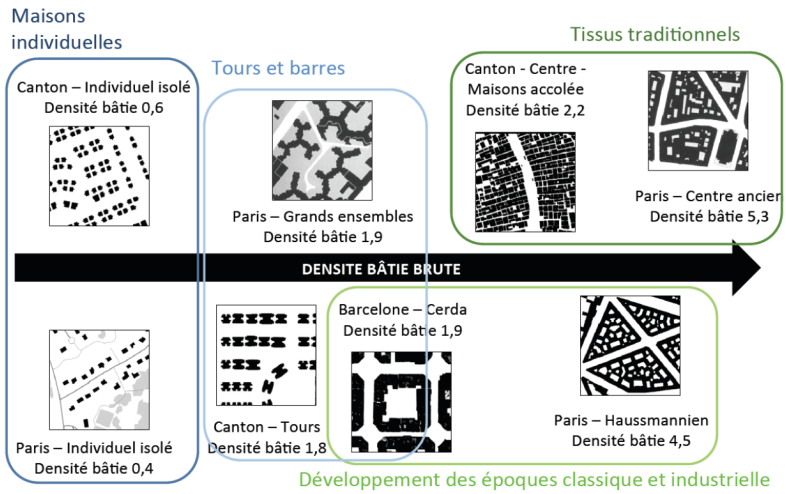


FIGURE 1.21 – Évolution de la densité au travers des âges vers une dé-densification (source : M. BONHOMME, 2013).

potentialités du territoire et étudier la densité peut donc se faire au regard de la croissance urbaine, entre croissance horizontale et verticale. MANCEBO (2014) propose d'ailleurs plusieurs définitions de l'étalement urbain : « croissance incrémentale et non-planifiée du développement urbain », « urbanisation dispersée indépendante des politiques d'aménagement », « valeurs faibles de densité, continuité, concentration, polarisation, nuclearité, multifonctionnalité, et proximité », « phénomène de croissance urbaine périphérique aux espaces urbains, associée à une logique de desserrement des agglomérations concernées » [MANCEBO (2014)].

On oppose donc souvent centre dense et zones périurbaines moins denses. Si l'on restreint le champ de l'étude à la question du transport, il semble y avoir consensus scientifique depuis plusieurs décennies : les villes plus étalées montrent une consommation énergétique plus importante pour la mobilité quotidienne que les formes plus denses [BART (2010)]. La figure 1.22 dessine ainsi la consommation d'essence par habitant en fonction de la densité d'habitants pour nombre de grandes villes du monde [NEWMAN et KENWORTHY (1989)]. Ces travaux, datant de 1989, marquent peut-être le début célèbre de la mise en correspondance entre densité et intensité de la consommation énergétique pour le transport.

JONATHAN et al. (2006) étudient ainsi la consommation d'énergie et la production de gaz à effet de serre (GES) des logements selon la densité de population en effectuant une analyse de cycle de vie de l'utilisation de l'énergie et des émissions des GES. Dans leur analyse, JONATHAN et al. (2006) considèrent les matériaux de construction (des bâtiments mais également des infrastructures), les coûts de fonctionnement des bâtiments et les transports tout en négligeant un certain nombre d'autres facteurs (trafic routier, perte de terres arables et forestières, maintenance des infrastructures, etc.) dont la prise en compte reste souhaitable [89]. Ils remarquent alors que les zones peu denses sont plus consommatrices d'énergie et émettrices de GES que les zones denses de 2 à 2,5 fois alors que ramenées au mètre carré habité, le surplus des consommations n'est plus que de 1 à 1,5 fois. Le choix de *l'unité* est donc important : considérer le droit de vivre dans

89. Les auteurs précisent que ces paramètres leur semblent sûrement pertinents (« *may be relevant* ») et qu'ils ont été exclus notamment par manque de données [JONATHAN et al. (2006)].

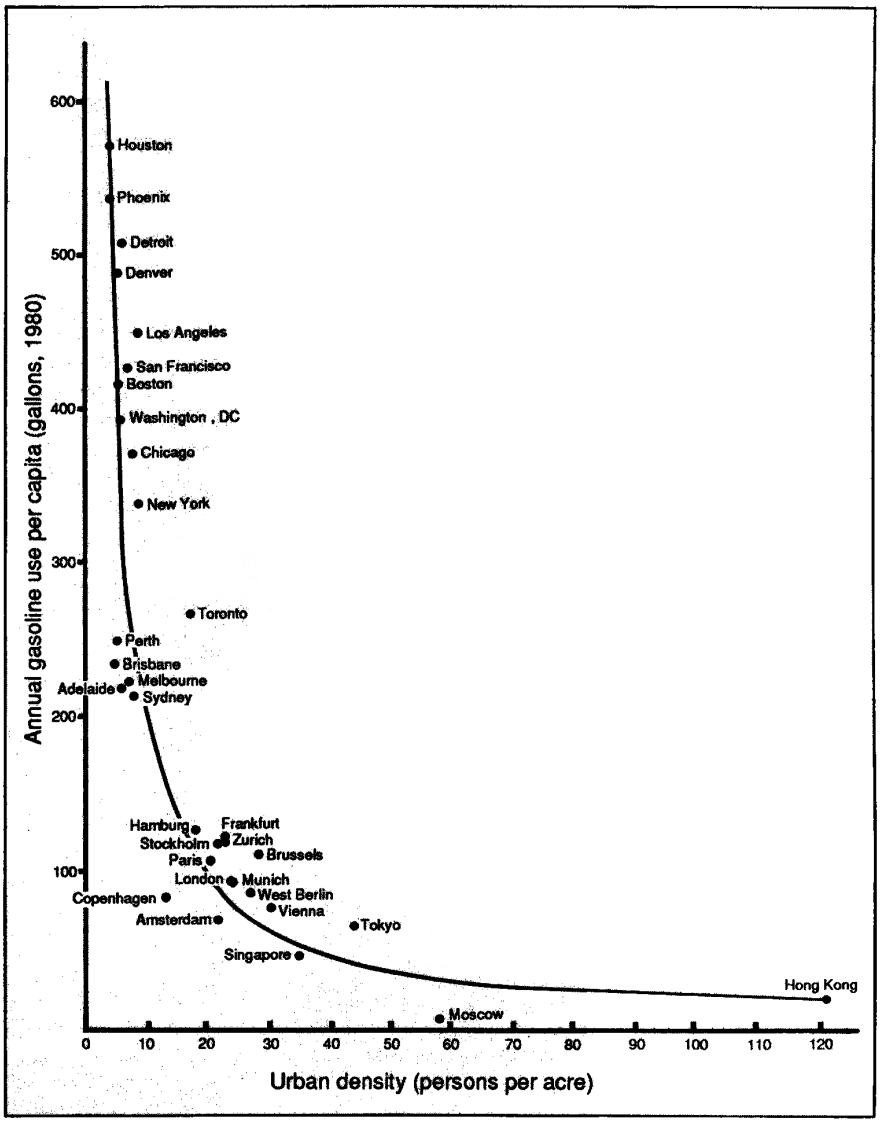


FIGURE 1.22 – Courbe de la consommation d'essence par habitant en fonction de la densité d'habitants pour les plus grandes villes du monde (source : NEWMAN et KENWORTHY, 1989).

un logement ou le droit au m² n'est pas la même chose ! Jonathan et al. (2006) insistent sur le besoin d'une analyse de cycle de vie complète pour enrichir le débat sur la densité urbaine, rejoints en cela par Heinonen et al. (2013) : le mode de vie des habitants et d'autres caractéristiques sur les formes urbaines doivent être pris en compte dans le bilan des émissions d'une population urbaine [Heinonen et al. (2013)]. Les émissions indirectes, par exemple dues à la production des biens de consommation, aux loisirs ou aux déplacements, peuvent ainsi très souvent contrebalancer complètement les gains dus à la densité. Les zones les plus urbanisées peuvent alors montrer des niveaux de consommation plus importants et un besoin de transport finalement comparable à celui de zones périurbaines moins denses (impliquant plus de trajets pour rejoindre les lieux d'emploi, de loisirs, de vacances, etc.). Les citadins urbains passent moins de temps chez eux mais en contrepartie utilisent plus intensément des services plus forts consommateurs d'énergie (restaurants, cinémas, etc.). Par exemple, Bliss (2017) constate simplement que la population du centre ville de Chicago fait plus de kilomètres par an en voiture et utilise des services plus énergivores que les habitants des banlieues de la ville [90] [Bliss (2017)]. Ces derniers consomment d'ailleurs une demande d'infrastructures bien plus importante même si cela reste une proportion faible du total du bilan énergétique de la ville. Du et al. (2016) estiment ainsi à moins de 0,5 % la partie de l'énergie *opérationnelle* – c'est-à-dire d'utilisation pendant la durée de vie – par foyer ou par habitant due aux infrastructures de transport, que ce soit dans le centre-ville ou en banlieue. Cela renforce les conclusions de Heinonen et al. (2013) et confirme le besoin d'analyses intégrant les comportements des habitants [91] et des caractéristiques des formes urbaines.

Influence sur les îlots de chaleur urbain

Un autre angle d'éclairage de la recherche autour de la densité de construction consiste à regarder l'influence de cette même densité sur les îlots de chaleur urbains [92]. Salvati et al. (2017) tentent de mesurer l'effet de la densité urbaine sur le climat urbain et en particulier sur l'intensité des îlots de chaleur urbains. La densité de construction est alors calculée assez simplement en regardant le ratio de surface au sol occupée par des bâtiments sur la surface totale de la zone. Pourtant, Salvati et al. (2017) trouvent une relation forte entre cette densité de construction et la consommation d'énergie, et concluent par le fait qu'une texture urbaine compacte aboutit à une réduction de la consommation d'énergie en zone climatique méditerranéenne par rapport à un habitat dispersé, et ce en tenant compte de l'effet d'îlot de chaleur urbain, compensé en quelque sorte par l'effet de masque des bâtiments. Salvati et al. (2017) proposent, comme développement futurs, de prendre notamment en compte l'accès au soleil.

M. Bonhomme et al. (2012) montrent également qu'une végétalisation de la ville est compatible avec de fortes densités. Le projet Genius conclut, en ce qui concerne le climat en ville, que l'influence de la végétation est bénéfique puis-

90. Il paraît difficilement pertinent de comparer l'étalement urbain américain de celui français ou même européen dans la plupart des cas, l'usage de la voiture, l'âge des villes, la taille des quartiers, la présence ou non de commerces de proximité étant complètement distinctes.

91. On pourra noter qu'il est possible que ceux-ci changent avec les conséquences de la pandémie du coronavirus de 2020 [Caumel (2020)].

92. Il est possible de se référer à la section II.1 du présent chapitre, p. 15, pour plus d'informations sur cette problématique dans la conception actuelle des villes.

qu'elle permet de contrecarrer l'effet d'îlot de chaleur urbain lié à l'accroissement de la population [M. Bonhomme et al. (2012)].

Certains travaux tempèrent ces conclusions : Arantes et al. (2016) réalisent une étude pour regarder l'optimisation de formes urbaines selon la densité, des critères de consommation énergétique et l'ensoleillement et concluent ainsi qu'« à l'échelle du morceau de ville, la densité comme seul indicateur de performance perd peu à peu de sa consistance. Les réflexions se diversifient pour englober des notions plus larges comme celles des formes urbaines » [Arantes et al. (2016)]. Leurs travaux sont toutefois limités à une parcelle seule alors que la modélisation de la ville entière serait plus pertinente puisque chaque parcelle influence les voisines.

Spécificités géographiques de telles approches

Il faut noter, avant de conclure cette partie, que les approches présentées dépendent du niveau de développement des zones considérées. La situation peut être radicalement différente selon les pouvoirs économiques et planificateurs des municipalités et des États, et suivant la dynamique avec laquelle croissent les villes. De façon assez évidente, la consommation par habitant dans les grandes villes des pays développés est ainsi plus importante que celle dans les pays moins développés [Madlener et Sunak (2011)]. Il faut bien sûr garder à l'esprit dans cette comparaison qu'une bonne partie de l'énergie utilisée au quotidien par exemple par une part importante de la population africaine consiste en des formes de biomasse souvent collectées à la main et sont difficilement quantifiables. Bhatta (2009) s'intéresse à la ville de Kolkata, en Inde, et constate que la baisse de la croissance ne s'accompagne pas forcément d'une densification et remarque que la problématique n'est souvent pas de savoir si la ville va voir un étalement mais plutôt avec quelle intensité et comment s'y préparer au mieux [Bhatta (2009)]. La croissance des villes n'est malheureusement pas toujours liée à une croissance économique, particulièrement dans les pays en développement avec l'émergence des *mégacités* : c'est alors parfois une croissance quantitative (des personnes arrivent [93] en grand nombre sur un territoire, sans possibilité d'emploi, en s'entassant dans des quartiers « informels » et des bidonvilles) plus que qualitative (hausse du niveau de vie par l'amélioration de l'accès aux services ou le développement économique d'une zone) qui se produit [Madlener et Sunak (2011)]. La densification est alors peu souhaitable face à la densité déjà élevée de personnes, la saturation des infrastructures et des services publics, le manque de planification, la faiblesse des autorités au niveau local, ainsi que la pauvreté des habitants [Bhatta (2009)]. Les problématiques sont donc tout autres dans de tels contextes. La densification n'y est pas une solution comme elle paraît l'être pour beaucoup dans les pays développés.

Retour au contexte de l'aménagement urbain

Ainsi, les indicateurs classiquement utilisés pour l'étude de la densité et de l'aménagement urbain ne sont plus suffisants face aux défis actuels [94]. L'efficacité énergétique de la densité, dans un monde européen marqué par une haute consom-

93. Plus ou moins volontairement évidemment.
94. *Cf.* partie II.1 du présent chapitre, p. 15.

mation matérielle et par des loisirs globalement énergivores en ville, n'est plus établie. Les caractéristiques socio-économiques des foyers et les sources d'importation de la ville doivent être prises en compte. De plus, l'amélioration des simulations et l'enrichissement des techniques d'analyse de données, notamment par l'intégration d'analyses du cycle de vie, permettent des approches plus holistiques et moins spécifiques.

Reste, dans le cadre de notre étude, que la situation de l'usage des sols est en général préoccupante. Les études que nous avons référencées jusqu'ici n'abordaient les questions associées à la ville que d'un point de vue urbain : la ville doit-elle se développer ? Comment ? Quel visage de la ville est-il le plus efficace ? Lorsque la ville s'étale et qu'elle prend des terrains à d'autres usages, lesquels privilégier ?

Les urbanistes d'ANMA intègrent quant à eux cette ambivalence entre nécessité relative d'une forte densité et son rejet partiel dans l'imaginaire collectif comme peuvent le montrer quelques-unes des pistes thématiques qui sous-tendent leur méthode. Ils parlent ainsi de « *densité vertueuse* », de « *nature en ville* », de projet « *ultra contextuel* » [Martin (2017) et Moreau (2017)]. Ces philosophies sont malheureusement, de l'aveu même d'une architecte dans son mémoire d'HMO [95], « de plus en plus difficiles à mettre en application face à la fragilité de la conjoncture économique et la rentabilité financière qui devient le maître mot du projet architectural » [Moreau (2017)].

Cette problématique de la densité résume donc bien à elle seule tous les enjeux que nous souhaitons intégrer et évaluer dans ce document : occupation des sols, bâti, développement urbain, compétition entre différents usages, stratégie métropolitaine et économique, qualité de vie et construction d'un habitat durable. Elle illustre également le besoin d'une approche globale de tels enjeux pour mieux évaluer l'impact sur long-terme des méthodes d'aménagement.

V. Quelle place pour la modélisation ?

Nous arrivons bientôt au terme de ce long premier chapitre sur le contexte urbain dans lequel doit s'inscrire notre exercice (la figure 1.23 présente l'avancement de la construction de notre proposition). La section précédente a décrit le fonctionnement de l'urbanisme en France depuis les années 70, son cadre réglementaire qui évolue pour intégrer la dimension environnementale et les changements qui le transforment depuis une dizaine d'années. Nous avons également souligné l'importance de la notion de densité et de son corrollaire qu'est la périurbanisation. Au cours de cette présentation, nous avons mis en avant le besoin d'un point de vue stratégique global pour une commune ou une intercommunalité en charge de la conception de son PLU ou de projets isolés comme des ZAC. En intégrant cette réflexion aux remarques précédentes faites à la section III.2.d (p. 48), il ne nous reste plus qu'à décrire les outils choisis pour finir la description

95. L'HMO ou l'habilitation à la maîtrise d'œuvre en son nom propre est le diplôme permettant à un architecte diplômé d'État (ayant donc fait le cursus normal de formation de cinq ans) de réaliser en son nom de la maîtrise d'œuvre (donc des projets, chantiers, etc.) et d'être inscrit sur la liste de l'ordre des architectes. Pour obtenir ce diplôme, l'architecte doit d'abord réaliser six mois au moins de mise en situation professionnelle et rédiger un mémoire sur une thématique liée à cette expérience.

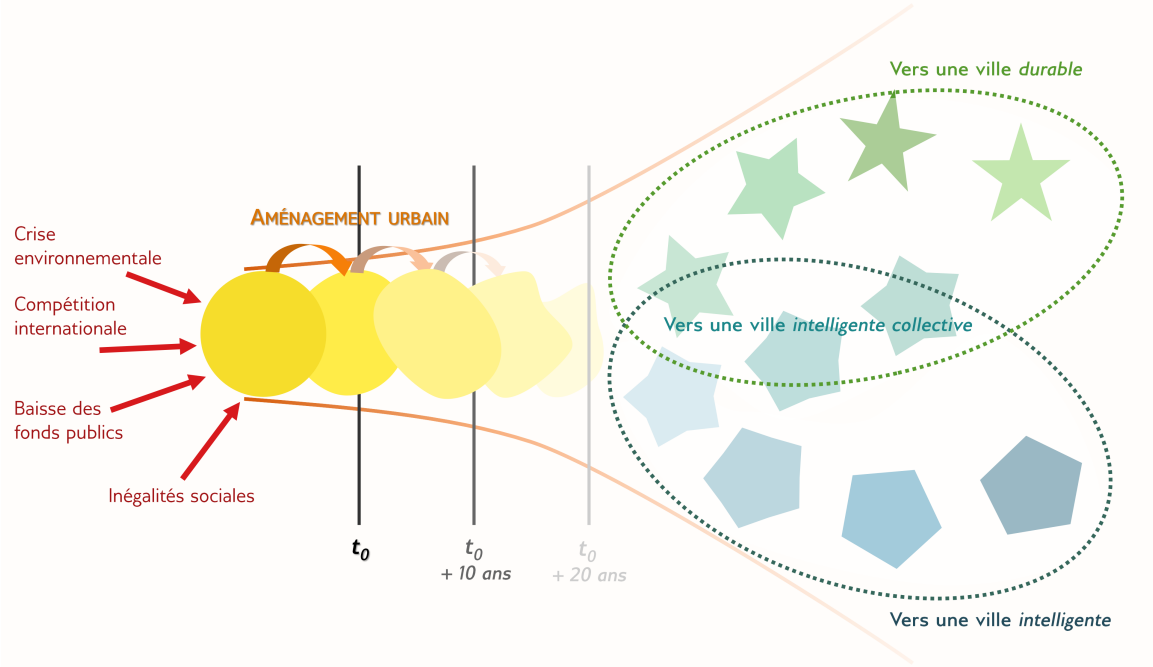


FIGURE 1.23 – Résumé du contexte : nous avons décrit plus précisément comment fonctionnait l'aménagement en France afin de comprendre comment la ville se crée.

de notre approche.

Il existe plusieurs outils pour soutenir la prospective et s'intéresser à l'aménagement urbain et à l'avenir des villes comme la création de scénarios et de politiques, la modélisation et la simulation, la consultation d'acteurs du secteur à travers des ateliers et la consultation publique [EMELIANOFF (2007b), KENNEDY et al. (2011) et van VLIET et al. (2010)]. La modélisation est le meilleur choix parmi la liste précédente afin de procéder à une allocation optimale des sols de la ville et de proposer des trajectoires d'aménagement les plus réalisables économiquement – au sens où elles coûtent le moins cher. Nous commencerons cette partie par une définition des termes de « modélisation » et de « modèles urbains » avant de présenter quelques exemples d'exercices de modélisation urbaine puis de décrire plus spécifiquement la « modélisation prospective » et les outils retenus pour notre approche.

V.1. « Modèle » scientifique plutôt que « modèle » urbain

Chacun des deux domaines, les sciences « dures » et techniques d'une part, l'urbanisme d'autre part, ont leur propre définition et usage d'un *modèle*.

V.1.a. Le modèle dit scientifique, un outil technique de représentation

Pour préciser la notion de modèle, nous pouvons partir d'une des définitions données par le dictionnaire de l'Académie Française : « *représentation, physique, graphique ou, plus généralement, mathématique, qui formalise les relations unissant les différents éléments d'un système, d'un processus, d'une structure, en vue de faciliter la com-*

préhension de certains mécanismes ou de permettre la validation d'une hypothèse [96]. » Il s'agit donc d'une représentation, d'une simplification visant à reproduire les traits principaux d'un système et en particulier, *ses relations internes*. Un modèle a donc un objectif double de compréhension des rouages d'un ensemble d'objets par l'exercice inhérent de déconstruction et de reconstruction d'une part, et d'étude du comportement global d'un système d'autre part. Premièrement, pour obtenir une reproduction fidèle – ou tout du moins aussi fidèle qu'on a besoin qu'elle soit –, il faut examiner comment sont caractérisés chacun des sous-systèmes formant l'objet modélisé, comment ils se comportent entre eux et la façon dont ces interactions aboutissent au résultat réel. C'est ce que nous fait dans la partie précédente sur la conception urbaine : mieux déterminer les procédures existantes pour que notre modèle rende au mieux ou au moins imite les comportements.

Cette déconstruction aboutit ensuite à une reconstruction mentale, physique, mathématique, informatique ou sur tout autre support pertinent. van der Wusten (2016) mentionne ainsi un genre de modèles urbains comme « descriptions théoriques (…) qui peuvent expliquer des aspects essentiels (…) du fonctionnement des villes » [van der Wusten (2016)]. Ce double effort de déconstruction et de construction atteste de la qualité de la méthodologie employée. Mais cela ne suffit pas et c'est pourquoi il y a un deuxième pan à cette mise en place : l'adéquation du modèle à la réalité, à l'objet que l'on tente de modéliser, et, le cas échéant, son utilisation [97].

Interviennent alors deux notions primordiales qui reviendront par la suite dans la description du modèle construit, celles d'incertitude et d'hypothèse. Rien ne sera jamais aussi réel que la réalité. Quelle que soit la science déployée, le réel finira par avoir raison (encore faut-il être sûr d'avoir bien la réalité face à soi, ce qui n'est pas toujours évident quand on s'attaque à des objets qui ne sont pas directement accessibles [98]). Il faut donc accepter, reconnaître et exposer les erreurs faites par la simplification pour ne pas promettre *trop de réalisme*. Ce sont les marges d'incertitude, conséquences des approximations faites. Ces approximations doivent elles aussi être notées et présentées. Elles sont inhérentes

96. *Cf.* https://www.cnrtl.fr/definition/modèle (consultée le 5 octobre 2020).

97. Prenons un exemple classique, la théorie de la gravitation dans le contexte du problème à deux corps : déconstruire la réalité revient à se rendre compte que la masse de chacun des objets intervient dans la force qu'ils exercent l'un sur l'autre, et que celle-ci est également inversement proportionnelle à la distance au carré entre eux. D'où la fameuse expression mathématique découverte par Newton modélisant les deux corps dans une équation mathématique : $F_{1/2} = G\frac{m_1 m_2}{d_{1/2}^2}$. Cette équation en elle-même est un modèle qui représente le comportement de deux corps ponctuels massiques placés dans le vide. C'est une vision simplifée de la réalité : les paires de corps qui s'exercent réciproquement une force d'attraction ne sont jamais isolés dans le vide, ponctuels, de masse constante. Néanmoins, pour comprendre puis reproduire, prévoir les déplacements d'objets, cet exercice de simplification et de réécriture est nécessaire et fournit des résultats satisfaisants par rapport à la réalité dans un grand nombre de cas.

98. On peut penser ici aux extrémités des échelles des ordres de grandeur : spatiale, l'extrêmement petit ou l'extrêment grand ; temporelle, le trop rapide ou le trop long. Elles ne sont accessibles que par le biais d'appareils de mesure extrêmement sophistiqués (on peut penser aux accélérateurs à particules, aux microscopes, aux télescopes, aux détecteurs d'ondes gravitationnelles, etc.). Il est d'ailleurs amusant de se rendre compte que ce sont notamment pour des questions d'échelle que les capacités d'un système à être efficace, voire à être efficient finissent toujours par être dépassées. Ce qui n'est pas sans rappeler la question d'une bonne taille pour les choses en général et plus particulièrement, celles humaines. On retrouve là les développements autour de la thèse de Rey (2014), plus longuement décrite dans la note 86 du présent chapitre, p. 63.

à l'exercice qui ne peut se réaliser qu'en fixant un grand nombre de paramètres extérieurs ou en postulant qu'ils n'ont pas d'influence significative sur le système étudié. Ces hypothèses vont être capitales dans notre cas, en particulier dans la discussion avec les urbanistes. En effet, la modélisation d'une ville ne peut être que réductrice par rapport au modèle mental qu'en ont les urbanistes qui tentent d'en appréhender toutes les dimensions dans le cadre de leurs projets (habitat, transports, économie, équipements publics mais aussi confort, qualité de vie, agréabilité, facilité, lisibilité, beauté, etc.). Pour pouvoir produire un dialogue fructueux, tant sur les tenants et les aboutissants du modèle, il est alors nécessaire de bien en spécifier les biais, les méthodes de construction, les hypothèses et les manques volontairement laissés de côté.

V.1.b. Le modèle dit urbain, une ville théorique adossée à une idéologie

De plus, cette définition de modèle est à mettre en relation à l'emploi fait du terme *modèle* en urbanisme, qui peut s'appuyer sur la deuxième définition suivante, également issue du dictionnaire de l'Académie Française : « *chose ou personne qui, grâce à ses caractéristiques, à ses qualités, peut servir de référence à l'imitation ou à la reproduction* [99]. » Le modèle urbain, au sens de la théorie urbaniste du terme, est une conception d'une ville qui applique parfaitement certains principes. Cette construction correspond en fait à une ville originellement imaginaire, voire utopique et souvent adossée à une idéologie ou tout du moins à une conception du rôle et des fonctions principales d'une ville qui se concrétise par une « *projection spatiale* [100] » de cette idée de la ville [Choay (1979)].

Choay (1979) identifie trois périodes dans la création et l'utilisation des *modèles urbains* dans l'histoire depuis la révolution industrielle : le pré-urbanisme, l'urbanisme et la critique de l'urbanisme. L'autrice propose tout d'abord deux classes des propositions idéologiques, celle des modèles *culturalistes*, empreints de « nostalgie », et celle des modèles *progressistes*, qu'elle complète ensuite avec une classe de modèles *naturalistes* [Carriou et Ratouis (2014)]. La validité de ces catégories de modèles comme clés pour comprendre l'évolution actuelle des villes, particulièrement au regard des formes décrites précédemment de villes intelligente et durable, est remise en cause [Carriou et Ratouis (2014)] et laisse entendre que cette vision n'est plus valide aujourd'hui dans un paysage qui présente plutôt une multitude de modèles locaux spécifiques combinés par les villes dans leurs choix d'aménagement [Héran (2015)].

L'étude menée par Bourdin et Idt (2016) dans « *L'urbanisme des modèles* » est également précieuse. Les modèles permettent, selon les deux auteurs, de chercher un équilibre entre deux impératifs de la profession, à savoir tout d'abord offrir de la *nouveauté*, programmer différemment, ne plus travailler de la même façon pendant le procédé de création, concevoir l'aménagement différemment. Et en même temps, leur utilisation doit *assurer des risques limités* dans un projet d'aménagement, de promettre en quelque sorte la viabilité et la bonne chance de réussite d'une opération. « Les pratiques utilisées ont fait leurs preuves ailleurs », dans un contexte similaire par exemple, et qu'elles ont l'approbation d'autres

99. *Cf.* https://www.cnrtl.fr/definition/modèle (consultée le 5 octobre 2020).
100. Carriou et Ratouis (2014) parlent d'« idéologie spatialiste » [Carriou et Ratouis (2014)].

professionnels, qu'« elles rencontrent un certain consensus dans le milieu de l'aménagement » [Bourdin et Idt (2016)]. Sans ces modèles, une proposition trop originale peut avoir du mal à convaincre un élu ou un expert d'une collectivité territoriale, parce qu'elle ne peut pas apporter plus de garanties que les tests effectués par les urbanistes, que les études supplémentaires menées sur des points spécifiques par des bureaux spécialisés. Ces justifications ne suffiront que très rarement à rendre compte de la pertinence d'une vision sans avoir eu d'expérience holistique possible que par la confrontation au réel d'un territoire et d'une population. Une rupture trop importante ou un changement brusque dans les façons de procéder, dans le déroulé habituel d'une procédure d'aménagement, peut être également vue comme trop risquée, trop dangereuse pour la pérennité de telles opérations [101], qui s'inscrivent sur de longues durées de l'ordre de la décennie, par les personnels impliqués des deux côtés de la table (décideurs et experts techniques de la collectivité d'une part et urbanistes, paysagistes, ingénieurs et architectes de l'autre) [Bourdin et Idt (2016)].

Ainsi donc, deux types de modèles sont appliqués à la ville et nous intéressent ici : les modèles *scientifiques*, souvent spécifiques à un territoire ou à une ville, servant à évaluer certains paramètres, à prédire une évolution ou à représenter un secteur particulier par exemple ; les modèles *urbains*, qui forment plutôt le support pratique de l'application de formes éprouvées et respectent souvent des visions idéologiques, politiques, philosophiques voire anthropologiques. Ces deux approches sont donc très distinctes, avec d'un côté des modèles particuliers à une situation ou à une ville et de l'autre une tentative d'universalisation d'un idéal. La ville durable, dans sa plus large définition discutée dans la partie III.1, n'est pas un modèle urbain au sens qu'elle n'est « pas dans le registre de l'utopie ou des bonnes intentions », mais qu'elle est plutôt la trajectoire qu'il faut déterminer et emprunter pour parvenir à un objectif [Héran (2015)]. C'est cette forme de modèle que nous retiendrons, comme une « pratique de l'action à répliquer » [Faburel (2014)] et, en ce sens, la modélisation scientifique est tout à fait pertinente comme approche pour soutenir cette démarche. Elle permet d'évaluer la pertinence de décisions et d'une trajectoire au regard d'un objectif. Un de ses risques dont nous nous sommes prémunis par la collaboration avec une agence d'urbanistes est de prétendre remplacer le travail des urbanistes, par exemple par la génération de formes urbaines à partir de contraintes [Shi et al. (2017)].

V.2. Exercices de modélisation urbaine

101. Un bon exemple de situation absurde que la rigueur semblant nécessaire dans ce genre de contexte peut créer m'a été donnée au sein d'ANMA : lors d'un projet ambitieux en termes d'efficacité et de résilience énergétiques, à Dunkerque, l'agence a proposé l'installation dans ses bâtiments de cheminées de lumière et d'air afin d'assurer une ventilation naturelle permettant des économies importantes de chauffage et de climatisation. La collectivité avait demandé, légitimement, quelle norme respectait de telles installations ou une preuve du bon fonctionnement du projet. Néanmoins, la version proposée étant complètement inédite à ce cas, il était impossible qu'un industriel se saisisse du dossier pour en construire une ailleurs ou pour faire la démonstration de son efficacité. Le cercle vicieux était bouclé, l'un ne pouvant démarrer et être pilote sans que l'autre n'ait eu lieu, la preuve de concept industrielle ne pouvant non plus être produite sans l'engagement politique et économique. Ainsi, Bourdin et Idt (2016) concluent que « la stratégie de la recherche radicale d'innovation correspond à des moments relativement *rares* de *fort volontarisme politique* ».

V.2.a. Une approche scientifique principalement énergétique

Des modèles scientifiques représentant la ville sur les questions environnementales sont largement issus des travaux pour la compréhension et la simulation de la balance énergétique des villes.

Une approche ayant produit un grand nombre de modèle est ainsi celle de la représentation des échanges énergétiques de surface par des approches physiques et dont les applications sont variées : suivi du changement climatique, étude de l'intensité et de la fréquence des îlots de chaleur urbains, prévision de la qualité de l'air et de la dispersion des polluants… [Grimmond et al. (2011), Grimmond et al. (2010)]. Ces modèles s'attachent sur une représentation physique précise et fondée théoriquement de la réalité des échanges physiques entre surfaces et environnement. Plusieurs éléments ressortent de la revue de littérature de Grimmond et al. (2010) : tout d'abord, les critères d'évaluation relative des modèles nous renseignent sur ce dont sont capables les modèles au moment de la rédaction de cette revue et sur la façon dont est approché le problème. Ainsi, la prise-en-compte ou non de la végétation est un enjeu important selon les auteurs et la variabilité saisonnière n'est pas toujours représentée. Ensuite, l'analyse faite par Grimmond et al. (2011) de ces 33 modèles différents permet de noter que « les modèles plus simples sont généralement aussi précis et efficaces que les modèles plus complexes [102]. » L'ajout d'informations plus précises sur la situation peut même dégrader les performances moyennes des modèles les plus détaillés alors qu'elle améliore grandement celle des modèles simplifiés [Grimmond et al. (2011)].

D'autres méthodes se concentrent sur l'estimation de la consommation énergétique des villes. Ce secteur est souvent mal compris car très varié, décentralisé, piloté par des individus et soumis à beaucoup de régulations (distinctes et souvent nationales). La variété des comportements des habitants impacte énormément la consommation mais les tentatives d'approches plus spécifiques sont limitées par des problématiques de confidentialité dans l'obtention des données [103] [Swan et Ugursal (2009)].

Keirstead et al. (2012) identifient six domaines se démarquant dans les études existantes sur la modélisation urbaine des questions énergétiques : « *la conception de technologies, la conception de bâtiments, le climat urbain, la conception de systèmes, l'évaluation de politiques et la modélisation de l'utilisation des sols et des transports* [104] ». Ils notent également que cette dernière problématique est en partie oubliée par la littérature dans les exercices de modélisation [Keirstead et al. (2012)].

Il existe des modèles à toutes les échelles mais modéliser un bâtiment isolé du microclimat local et du contexte énergétique urbain, ou réciproquement travailler sur le contexte seul sans intégrer de simulation des bâtiments ne suffit plus. Il convient de *modéliser à la fois le système global et l'échelle du bâtiment* pour une meilleure précision [Allegrini et al. (2015)]. Les *solutions énergétiques intégrées*

102. « *In general, the simpler models perform as well as the more complex models based on all statistical measures* » [Grimmond et al. (2011)].

103. Comme certains débats récents le montrent autour de Linky par exemple [CNIL (2018) et Tual (2018)].

104. « *Technology design*, *building design*, *urban climate*, *systems design*, *policy assessment* and *land use and transportation modelling* » [Keirstead et al. (2012)].

pour les collectivités (ou Integrated Community Energy Systems) permettent de réaliser des économies d'énergie sur des ensembles collectifs (zone rurale, quartier, grande ville), par la mutualisation des utilisations ou productions d'énergie, une réflexion plus poussée de l'orientation des bâtiments, et d'autres démarches plus ou moins complexes technologiquement [Mendes et al. (2011)]. Beaucoup des problèmes rencontrés par les métropoles sont en fait l'accumulation de problèmes locaux et Engel-Yan et al. (2005) vont même plus loin en insistant sur le rôle des décisions prises au niveau du quartier. Inversement, le développement d'un quartier ne peut se faire sans la prise en compte des contraintes exogènes (politique de transport au niveau communal *a minima*, lois nationales…) et il est difficile d'atteindre les objectifs de durabilité des voisinages sans avoir des systèmes d'infrastructures à l'échelle urbaine qui soutiennent ces objectifs [Engel-Yan et al. (2005)].

Les approches qui se penchent sur l'occupation des sols à des horizons temporels lointains prennent plusieurs formes distinctes [105]. Certaines d'entre elles utilisent ainsi des systèmes de grille régulière [Fontaine et Rounsevell (2009), Holman et al. (2005) et Viguié et al. (2014a)], des automates cellulaires [Solecki et Oliveri (2004)], des modèles multi-agents [Fontaine et Rounsevell (2009) et Rousseaux et al. (2012)], des projections sur systèmes d'information géographique [Mokrech et al. (2012)], des modèles d'évaluation intégrée [106] [Holman et al. (2005) et Walsh et al. (2011)]. L'approche déployée par Masson et al. (2014) puis de Munck et al. (2017) combine ainsi plusieurs de ces formes de modèles [107] pour parvenir à étudier à une échelle temporelle longue les effets sur le climat local et les îlots de chaleur urbains [Masson et al. (2014)].

V.2.b. Modèles *LUTI*

Les modèles *LUTI*, pour *Land use - transport Interaction* ou *Interaction entre occupation des sols et transports*, forment une famille de modèles urbains nés aux États-Unis dans les années 50 avant de se répandre en Europe. Ils étudient les relations entre la mobilité des individus dans une ville et l'occupation des sols [Gerber et al. (2018) et Wilson (1998)]. Ils font face à d'importantes problématiques de réconciliation d'échelles spatiales [108] et font appel à de nombreux développements théoriques en économie, micro-économie ou géographie [Gerber et al. (2018)].

Ces modèles postulent que les politiques de transport et d'urbanisme sont fortement liées et doivent être représentées ensemble dans un modèle afin d'en étudier les interactions [Geurs et van Wee (2004)]. Toutefois, les travaux de modélisation étudiant l'impact du transport sur l'occupation des sols sont beaucoup moins nombreux [Wegener et Fuerst (2004) et Wilson (1998)] et les modèles intègrent peu de *feedback* dans ce sens [Aljoufie et al. (2013)]. Wegener et Fuerst

105. Ce paragraphe est largement inspiré du travail réalisé pour une publication en cours de *review*.

106. « *Integrated assessment models* ».

107. Plus précisément, Masson et al. (2014) utilisent SLEUTH, modèle géographique d'occupation des sols, NEDUM, modèle de croissance urbaine basé sur une grille, et GENIUS, modèle de base pour l'évolution des blocs. de Munck et al. (2017) rajoutent le lien avec des modèles énergétiques de surface et d'équilibre énergétique, TEB et SURFEX.

108. Ces difficultés sont logiquement liées au besoin de considérer l'individu et non plus le groupe pour éviter des erreurs dues à l'homogénéisation inhérente à l'agrégation [Hägerstrand (1970)].

(2004) avancent quelques pistes d'explication comme la grande différence des échelles de temps considérées, rejoints en cela par Geurs et van Wee (2004). Ils proposent également comme raison la complexité de telles études, l'occupation des sols étant influencée par une variété importante de paramètres tels que les modes de vie, la dynamique démographique, le développement économique, etc. [Geurs et van Wee (2004) et Wegener et Fuerst (2004)] Ces modèles ne considèrent d'ailleurs pas les infrastructures dans leurs boucles d'interactions et se concentrent plutôt sur les facteurs socio-économiques [Acheampong et Silva (2015)]. Tannier et al. (2016b) mettent ainsi au point un modèle de simulation très poussé, MobiSim, pour étudier plusieurs scénarios d'aménagement à l'échelle de la métropole de Besançon : leur modèle se base sur deux jeux d'acteurs, les habitants et les foyers.

Depuis l'article de Wegener et Fuerst (2004), quelques études se sont penchées plus spécifiquement sur l'influence des changements sociétaux actuels [109] sur les relations entre mobilité et occupation des sols, soulignant les modifications possibles d'organisation spatiale liées au « retour du vélo » ou au développement des vélos électriques par exemple [van Wee (2015)].

L'essor de l'informatique depuis la fin des années 70 et notamment l'apparition des *systèmes d'information géographique* (SIG) ont contribué à améliorer grandement les modèles LUTI, notamment en facilitant la conception d'interfaces utilisateurs pratiques [Wilson (1998)]. La famille de modèles LUTI a aujourd'hui à nouveau besoin d'évoluer, notamment en Europe, pour passer des problématiques ayant conduit à leur naissance il y a près de 60 ans aux enjeux actuels : l'heure est moins à la croissance urbaine sur des terres agricoles et plus aux évolutions internes aux villes [van Wee (2015)]. Malgré les développements récents, les facteurs environnementaux manquent également [Acheampong et Silva (2015)]. La collaboration poussée avec des autorités locales et des aménageurs fournit des résultats intéressants et facilite la communication des résultats aux décideurs mais également de meilleures interactions entre les acteurs présents habituellement (hors du contexte de l'étude scientifique) [Tannier et al. (2016b)].

Ces modélisateurs prônent la reproductibilité des *modèles* [110], en particulier pour des applications court terme [Wilson (1998)], là où nous voyons dans la reproductibilité de la *méthodologie autour des données* une meilleure chance de correspondre aux spécificités d'un territoire et de se projeter sur de longues durées.

V.2.c. Une grande diversité d'outils mis à contribution

Il est extrêmement fréquent de coupler n'importe quel modèle urbain à un *système d'information géographique* (SIG) [Alhamwi et al. (2017) et Ascione et al. (2013)]. Bien souvent, les chercheurs travaillant avec des SIG n'utilisent ces derniers que de deux façons (qui restent pertinentes dans notre cas mais ne constituent pas à proprement parler une *intégration* avec les modèles) : l'*obtention et la mise-à-disposition de données pour le modèle* en premier lieu, la *visualisation* des résultats

109. « Vieillissement de la population », « *peak car* » (pic de l'automobile), « changements de comportements et de préférences des individus », « retour du vélo » dans les moyens de locomotion… [van Wee (2015)]

110. « *The reproductive capabilities of the models are good. (…) Most of the equilibrium models developed in the 1960s and 70s have stood the test of time in offering at least reproductive power* » [Wilson (1998)].

en deuxième lieu [Alhamwi et al. (2017), Arampatzis et al. (2004), Ascione et al. (2013), Clarke et Gaydos (1998), Din et al. (1998) et Fragniere et al. (1999)]. De plus, Allegrini et al. (2015) remarquent que l'intégration dans des SIG ou des logiciels de CAO [111] est bénéfique pour la manipulation de géométries et l'utilisation de données géolocalisées, la discussion et l'intégration dans les processus d'experts [Allegrini et al. (2015)]. Plus généralement, la question des données est présente dans *tous les domaines de modélisation*, de façon croissante, devenant souvent une des limites centrales des approches [Allegrini et al. (2015), Barles (2009), C. Bonhomme et al. (2017), Engler (2015), Keirstead et al. (2012), Murphy (2017) et Royal Statistical Society (2016)].

Mendes et al. (2011) détaillent également plusieurs catégories d'outils pouvant être utilisés pour l'étude des villes :

- *bottom-up* vs *top-down* : cette distinction est très fréquente dans la littérature [Belussi et al. (2017), Fonseca et Schlueter (2015), Frayssinet et al. (2017), Le Gallic et al. (2017) et Mutani et al. (2016)]. Il arrive également que ces deux approches soient jointes par couplage [Fonseca et Schlueter (2015), Mutani et al. (2016) et Mutani et Todeschi (2017)] ;
- de *simulation* ;
- d'*évaluation de scénarios* ;
- sur les *équilibres* ;
- d'*optimisation opérationnelle* ;
- d'*optimisation d'investissements* (les outils d'optimisation sont généralement également des outils d'évaluation de scénarios).

Mendes et al. (2011) font ensuite une analyse de plusieurs outils pouvant être utilisés sur ces thématiques, particulièrement ceux dits « *bottom-up* ». En vrac, citons *HOMER*, *DER-CAM*, *EAM* et plus spécifiquement *MARKAL/TIMES*.

V.2.d. Limites et conclusions pour le placement de notre approche

L'étude des exercices de modélisation sur la ville nous a montré plusieurs éléments pour la définition de notre approche. Il y a bien une interaction entre deux échelles, entre espace et temps [Hägerstrand (1970)], entre durée courte et durée longue [Geurs et van Wee (2004) et Wegener et Fuerst (2004)], entre événements locaux et tendances globales [Allegrini et al. (2015) et Thomas et al. (2018)], entre dynamique et statique, sur laquelle notre approche se positionne par le choix du long terme et d'une grande échelle, celle de la métropole.

Les remarques de van Wee (2015) résument les questions que doivent se poser les modélisateurs aujourd'hui : « où construire de nouvelles zones résidentielles ? Où planifier de nouvelles zones commerciales et industrielles ? [112] » [van Wee (2015)].

111. *CAO* ou Conception assistée par ordinateur.

112. « *Where to build new residential areas? Where to plan new commercial and industrial areas? What land-use change can be expected due to building new motorways and railway lines, stations and motorway exits? What land-use changes can be expected if congestion is strongly reduced by increasing the capacity of motorways?* » [van Wee (2015)]

Nous avons vu également que l'occupation des sols est un thème oublié dans bien des sujets traités, les études préférant se concentrer sur les questions énergétiques pures, sur la représentation physique des phénomènes (notamment pour la météorologie ou la simulation climatique), sur le transport et ses tenants socio-économiques. Les modèles LUTI illustrent le besoin de discussion entre deux domaines, entre deux professions, entre deux acteurs, les ingénieurs (plutôt en charge du transport) et les urbanistes (plutôt en charge de l'aménagement). Pour autant, la section précédente sur la conception urbaine a souligné l'importance du foncier et de sa maîtrise et la création d'un outil global de représentation de l'évolution de l'occupation des sols est donc nécessaire au vu du délaissement partiel des questions foncières dans les modèles revus ici.

V.3. Le développement d'un modèle basé sur la famille MARKAL/TIMES

La prospective utilise des modèles depuis maintenant plusieurs décennies et il est possible de voir un rapprochement important entre les deux *disciplines* depuis les années 80 [Hatem (2004)].

La première pierre apportée à l'édifice du rapprochement entre modélisation et prospective est célèbre : le Club de Rome, en 1972, propose un premier exercice d'étude du futur et des développements potentiels des systèmes économiques, écologiques et humains à partir de la mise en équation de boucles de rétroactions entre quelques macro-paramètres majeurs. Initié par Aurélio Peccei, un industriel italien, le Club de Rome est un groupe multidisciplinaire qui remet en question l'équivalence progrès et bien être. Composée en partie de mathématiciens et d'ingénieurs ayant travaillé sur la dynamique des systèmes, l'équipe de Jay Forrester et de Robert Meadows développe ainsi un premier modèle sobrement appelé WORLD3 qui leur permet de tester plusieurs scénarios (hausse de la pollution, raréfaction des ressources…) et de voir leur impact sur la population. Cette nouvelle forme d'utilisation des outils mathématiques et informatiques pour la réflexion sur les décisions politiques et les conséquences de celles-ci sur les sociétés humaines rencontre un succès mitigé en termes de changements concrets mais conduit toutefois à une prise de conscience des inconvénients prévisibles du modèle économico-productif de l'époque (et actuel, voire exacerbé aujourd'hui) et prouve surtout la pertinence de la modélisation prospective.

La modélisation apporte en effet des justifications d'optimalité aux trajectoires proposées qui sont obtenues par la minimisation d'un objectif sous les contraintes définies. Elle est donc un support privilégié pour la prospective et ajoute une légitimité communiquable auprès du grand public par rapport aux méthodes plus traditionnelles qui ne sont pas toujours facilement présentables [113] [La Tronche

113. En tant que discipline, la prospective n'a pas *a priori* un besoin absolu de modèle tel qu'on l'a défini plus haut. De nombreux scientifiques ont pratiqué et pratiquent des études *prospectives* sans recourir à des outils d'optimisation (par exemple, on pourra regarder les études de Fellmann et Morel, 1991 ; Lamblin, 2010 ; Lardon et al., 2016). Ces démarches passent souvent par la construction de scénarios, notamment à l'aide de méthodes comme le *backcasting* (c'est-à-dire partir d'un état souhaitable dans le futur et construire les politiques à mettre en place d'ici là pour y parvenir) [Guitton-Boussion (2019)], et leur comparaison [Gallez (2002)]. Ces approches ne sont pas toujours faciles à défendre dans leurs méthodes [La Tronche en biais (2019)] et

en biais (2019)].

Ici n'est pas le lieu de faire une étude exhaustive et poussée de tous les modèles existants. D'autres ont déjà comparé les avantages et les inconvénients des solutions énergétiques [114] et discuté de la pertinence d'une approche *bottom-up* par rapport à une approche *top-down*. Notre cas est particulier car il comprend un double objectif d'étude prospective urbaine et de projection spatiale de résultats pour une meilleure communicabilité de ceux-ci. En ce sens, nous nous différencions des approches précédemment citées, dont entre autres les travaux de Tannier et al. (2016b), de Munck et al. (2017). En effet, c'est réellement le travail de l'urbaniste qui est au cœur de notre exercice et non l'évolution des foyers, l'impact de la végétation sur les consommations énergétiques. Nous rejoignons donc plutôt les efforts de l'approche de Rousseaux et al. (2012) par une autre méthodologie, celle de l'optimisation *bottom-up*.

Le modèle *bottom-up*, par sa description détaillée des objets impliqués, correspond à une approche urbaine attentive à la spécificité du territoire et de la situation locale. L'urbanisme comme la modélisation prospective s'appuient en effet sur des diagnostics de territoires pour la construction de leurs propositions ou de leurs modèles : l'urbaniste cherche à comprendre l'organisation du bâti (quels acteurs, quel âge, quel usage…), les flux de mobilité, les infrastructures, la répartition du foncier entre les acteurs ; le modélisateur en prospective énergétique établit une description détaillée des objets formant le système énergétique de référence, renseigne les paramètres des technologies déployées sur le territoire étudié et remplit le bilan des flux de commodités entre ces technologies. Ce travail de récupération de données et de description est primordial pour les deux disciplines.

Nous allons donc nous inspirer de la modélisation prospective énergétique et notamment de son utilisation de paradigmes d'optimalité : proposer des trajectoires optimales selon les critères retenus, en général le coût, est pertinent dans un contexte où les ressources financières publiques se raréfient. Ce modèle sera piloté par l'évolution de la population, contribuant à en faire un modèle centré sur les habitants et non sur les revenus que l'on peut tirer ou sur un objectif de communication.

Parmi les nombreux modèles existant dans ce domaine (ETEM [115], OEMOF [116],

---

sont déjà employées en partie par les urbanistes dans leur démarche d'aménagement : ceux-ci proposent plusieurs scénarios de développement, voire participent eux-mêmes à des exercices prospectifs [Uri et al. (2013)].

114. On pourra se référer aux revues de littérature suivantes :
   - celle de Geneletti et al., 2017 pour la mise en place des notions de développement durable dans la planification des périphéries,
   - celles de Keirstead et al., 2012 et de Grimmond et al., 2011 ; Grimmond et al., 2010 pour des analyses des modèles énergétiques urbains,
   - celle de Moghadam et al., 2017 pour le déploiement de stratégies énergétiques spatiales,
   - celle de Reinhart et Cerezo Davila, 2016 pour les modèles énergétiques de bâtiments,
   - celles de Islam et al., 2015 et de Cabeza et al., 2014 sur l'utilisation des analyses de cycle de vie pour les bâtiments,
   - celles de Mendes et al., 2011 et de Vreenegoor et al., 2008 pour une approche concentrée sur les systèmes énergétiques à l'échelle d'un quartier,
   - celle de Alhamwi et al., 2017 sur l'utilisation des systèmes SIG.
115. *Cf.* https://etem-ar.ordecsys.com/base.php (consultée le 14 octobre 2020).
116. *Cf.* https://oemof.org/ (consultée le 14 octobre 2020).

OSeMOSYS [117], SURFEX [118] et TEB [119]…), nous avons choisi la famille de générateurs TIMES [120]. Les modèles TIMES répondent aux exigences formulées ci-dessus, ont vu de nombreuses applications prospectives à des échelles variées, internationales [Føyn et al. (2011) et Remme et Blesl (2008)], continentales [Blesl et al. (2010) et Kypreos et al. (2008a)], nationales [Anandarajah et Strachan (2010), Assoumou et Maïzi (2011) et Chiodi et al. (2013)], voire des approches de milieux urbains [Gargiulo (2016)] et des intégrations de notions plus transversales [Briens (2015) et Le Gallic (2017a)] comme l'est l'urbanisme par rapport aux problématiques énergétiques.

Au vu des conclusions de cette partie, il nous faut considérer l'occupation des sols comme un des paramètres majeurs à considérer dans notre approche, le foncier consistant en une ressource capitale dans les processus de conception urbaine comme nous l'avons vu dans la section précédente. Cette section et les études autour du phénomène d'îlot de chaleur urbain (voir section II.1.d, p. 19) ont également souligné l'importance du bâti dans la lutte contre le changement climatique en ville. Notre modèle intégrera donc ces deux dimensions. En nous inspirant de la construction d'un modèle TIMES énergétique, nous allons construire un modèle TIMES de représentation de l'occupation des sols et des bâtiments pour la métropole de Bordeaux.

Nous complèterons donc notre modèle TIMES, *a priori* spatialement grossier, par d'autres outils pour obtenir une représentation géographique des résultats prospectifs et améliorer la compréhension de l'impact des décisions politiques et des choix d'aménagement. Ensuite, l'agrégation de l'information par un indicateur simple et explicite facilite la discussion autour des résultats : les îlots de chaleur urbains étant un enjeu central de la réaction des villes au changement climatique, la température est un indicateur pertinent et représentatif des impacts du changement climatique. L'urbanisme comprenant une part importante de présentation et d'exposition des situations ou des projets, l'exercice de modélisation ne se suffit pas à lui-même et requiert cette dernière étape de communication auprès du public concerné, facilitée par l'utilisation des SIG [Arampatzis et al. (2004) et Spatial Sciences Institute (2020)]. Le choix des éléments représentés et la façon dont ils le sont (échelles, couleurs) finissent souvent par être politiques pour orienter une prise de décision, choquer un public, etc. [121] Et la variété des parcours et opinions des personnes visées par une présentation ou une communication rend improbable l'univocité d'un propos tenu (en bien ou en mal). Quelques-unes des questions principales qui se posent à tout acteur choisissant d'utiliser et de présenter des données sur un territoire sont ainsi celles du public visé et de l'objectif cherché (que veut-on montrer, veut-on faire un portrait, comprendre, illustrer une évolution, partager des constats ?) avant de regarder l'échelle, les sources, et les opérations à réaliser.

117. *Cf.* http://www.osemosys.org/ (consultée le 14 octobre 2020).
118. *Cf.* http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article145&lang=fr (consultée le 14 octobre 2020).
119. *Cf.* http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article199&lang=fr (consultée le 14 octobre 2020).
120. *Cf.* https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times (consultée le 14 octobre 2020).
121. En particulier, le cours « *Acteurs et outils du projet urbain* » de Manon Loisel au sein de la formation Urbanisme et Population a illustré ce principe en exposant que le regard que portaient les élus de la métropole Aix-Marseille-Provence sur leur propre territoire – et sur ses fractures – avait été modifié après des présentations de données de l'INSEE.

VI. Résumé et formation de la problématique

Nous avons établi le cadre général dans lequel s'inscrit notre approche :

- un contexte politique marqué par une inertie importante des États et par un grand nombre d'initiatives des communes pour s'affirmer en tant qu'acteurs de premier plan dans la lutte contre le changement climatique ;
- une situation institutionnelle française complexe avec la répartition des compétences relatives à ces problématiques entre plusieurs niveaux ;
- un besoin réel d'amélioration des conditions sanitaires de vie en ville, en particulier relatives à la pollution de l'air ;
- l'augmentation de la fréquence des périodes de fortes chaleurs et autres événements climatiques dangereux pour les habitants et habitantes des villes ;
- une métropole bordelaise à plusieurs visages, habitée par une dynamique d'aménagement ambitieuse mais qui s'est essoufflée face au contexte difficile et à des mouvements internes différents ;
- une faible maîtrise publique du foncier à Bordeaux et la nécessité de concilier les acteurs privés, les élus et la population.

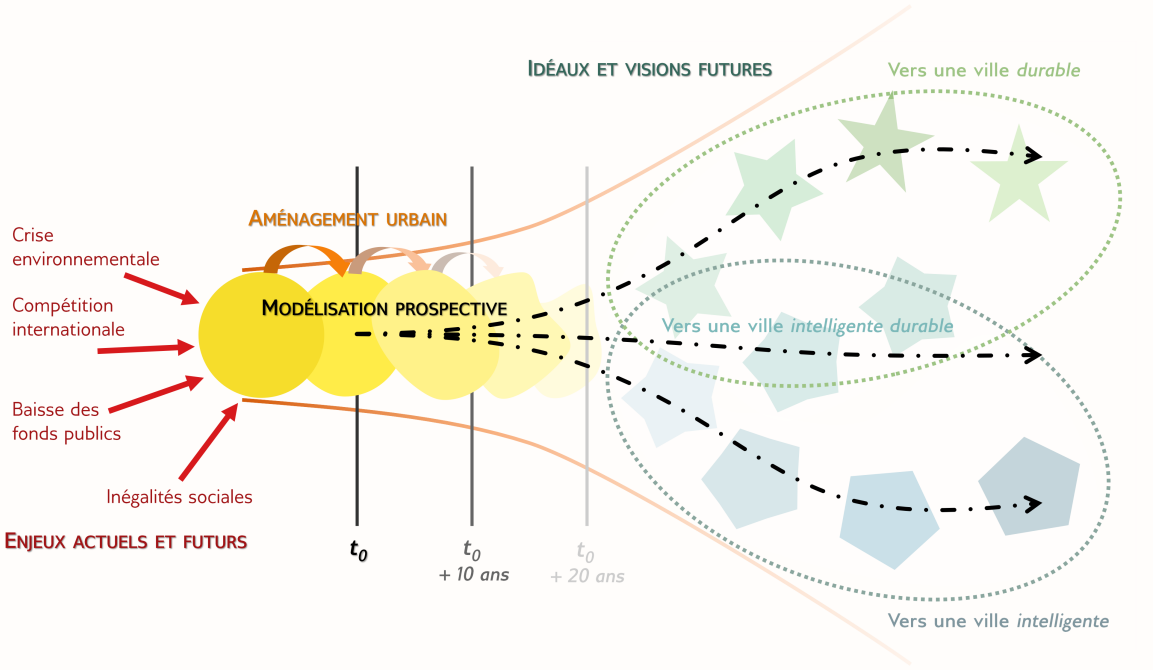


FIGURE 1.24 – Résumé du contexte : nous avons montré comment la modélisation prospective peut permettre d'accompagner l'aménagement urbain pour correspondre à des visions futures de villes.

Ce chapitre (voir figure 1.24) a tout d'abord fait l'examen de la situation actuelle et des enjeux principaux, crise environnementale, inégalités sociales et compétition internationale, qui se présentent aux villes aujourd'hui et qui doivent guider nos choix d'aménagement. Nous avons présenté ensuite trois formes de villes telles qu'elles sont proposées, théorisées voire même construites par différents acteurs : ces trois visions distinctes, la ville durable, la ville technologiquement intelligente et la ville intelligente collective, ont finalement des traits communs

et peuvent être *a priori* combinées pour répondre le plus efficacement aux problématiques urbaines. En poussant l'analyse, nous avons constaté que deux d'entre elles témoignent d'un rapport au futur particulier et mettent finalement l'accent sur la mise en place d'actions, sur le choix de trajectoires plutôt que sur la seule application de solutions pratiques ou le suivi d'indicateurs. Cette attitude face à la construction du présent et de l'avenir est en tout point similaire aux principes de la démarche du prospectiviste comme nous l'avons alors souligné : la ville durable correspond par exemple à une véritable approche prospective en ce qu'elle « prétend renouveler l'action » [Mathieu et Guermond (2011)]. La prospective, rapidement définie et caractérisée, s'appuie sur un diagnostic du territoire [122] et sur la description de scénarios. La prospective est donc toute indiquée pour soutenir la démarche des urbanistes dans leurs décisions, en gardant à l'esprit ses limites, notamment le fait qu'il ne faut pas la confondre avec la prévision [123].

Quelle place pour le chercheur dans le déploiement de ces nouvelles visions de la ville ? Mathieu et Guermond (2011) proposent de partir du discours ambiant pour le retravailler, le comprendre et le critiquer. Nous avons donc décrit la façon dont fonctionne la construction de la ville en pratique en France pour définir au mieux notre approche prospective de ces enjeux et l'intégrer parmi les démarches urbanistes. Les villes se construisent à travers le jeu de nombreux acteurs, publics comme privés, dans des procédures formalisées ou informelles, par une collaboration entre une collectivité territoriale et des entreprises ou par des Appels à Projets Innovants, avec des soucis de rapidité, de rentabilité, de répondre à des besoins locaux, d'image, de changement, de trouver des solutions à des crises. Il apparaît souhaitable voire inévitable, au vu des tendances des dernières décennies dans le domaine, que public et privé collaborent plus étroitement aujourd'hui pour continuer à développer la ville [Orillard (2018)]. Néanmoins, en vue de préserver l'intérêt public, c'est-à-dire que l'objectif de tous ces déploiements reste de répondre en premier lieu aux éléments indispensables et élémentaires des habitants (qui peuvent varier selon la localisation, la culture, etc.), il paraît nécessaire que l'autorité publique conserve une stratégie globale de développement sur l'ensemble de son territoire, sans que l'innovation non pérenne et la mode ne dévient de façon trop importante des principes de son action. De plus, le foncier est de moins en moins contrôlé dans certaines métropoles (et en particulier à Bordeaux) par une entité publique, effet qui peut aller en s'accentuant avec la montée des prix dans ces mêmes villes. Ce morcellement rend plus complexe toute opération d'envergure et l'application des outils classiques de l'urbanisme.

Une métropole comme celle de Bordeaux, concernée à la fois par cette absence de maîtrise des terrains, par l'augmentation du prix au m² et par le besoin de continuer à se développer tout en prenant en compte les problématiques environnementales, sociales et économiques, a *donc* besoin d'outils, d'informations supplémentaires dont elle ne dispose pas forcément aujourd'hui pour planifier. Pour répondre à la façon dont Bordeaux Métropole (alors CUB) a consulté au début de la décennie des agences d'architectes et d'urbanistes pour ses 50 000 logements

122. La prospective répond sur ce point aux limites de la *smart city technologique* qui « est présentée comme un phénomène global qui prête peu attention aux contextes locaux » (« *has been presented as a global phenomenon with little attention to local contexts* ») [Sepasgozar et al. (2019)].

123. La charte d'Athènes insiste notamment sur le besoin de prévision : « on distingue nettement dans ces lignes [extraites de la charte] le pouvoir prévisionnel (la prospective dirions-nous aujourd'hui) que Le Corbusier attribue à la science mais aussi à l'architecture-urbanisme. »[Brausch (2016)]

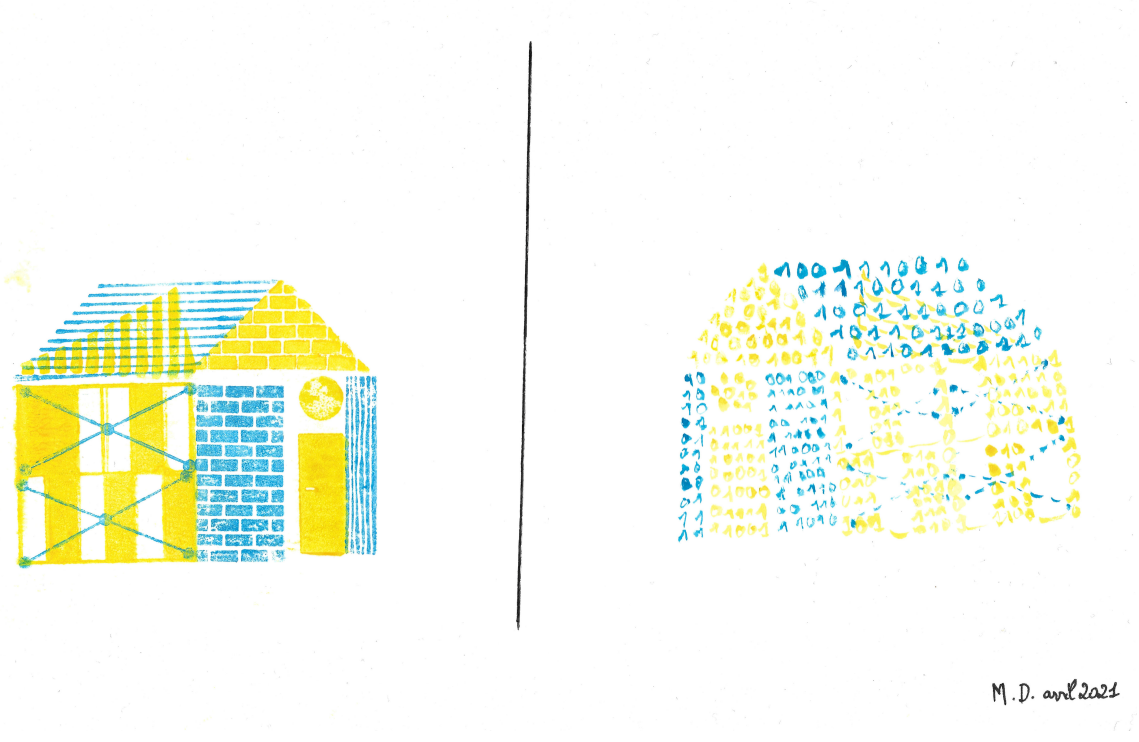
d'ici 2030, il faut proposer un *exercice de prospective* et d'études de scénarios pour un meilleur contrôle du foncier ou, en tout cas, pour aider à élaborer une stratégie foncière et urbaine considérant les enjeux susmentionnés. Cet exercice doit s'appuyer sur les constats faits précédemment : le changement climatique, lié particulièrement en ville à l'artificialisation des sols, impose de plus en plus un pilotage long terme des actions à fortes répercussions comme l'aménagement urbain ; les propositions de villes futures montrent l'ouverture progressive des institutions, des industriels et du public à un changement de paradigme ; et les conclusions sur le retrait partiel des autorités publiques soulignent la difficulté à mener une politique foncière globale et cohérente avec l'ensemble des problématiques urbaines. Enfin, l'étude bibliographique des modèles urbains existants nous ont permis de conclure la présentation de notre approche et de justifier la pertinence de la construction d'un modèle prospectif urbain tout en notant l'importance de la finesse spatiale. Les conclusions de la section II.1 sur la crise environnementale et particulièrement les îlots de chaleur urbains font de ceux-ci un indicateur remarqué en urbanisme et légitiment les développements supplémentaires pour passer des résultats de l'exercice prospectif à une représentation spatiale de l'effet sur la température à l'échelle de la métropole.

Cette construction d'un modèle, ou pour être exact de plusieurs modèles, se nourrit d'une étude quantitative, présentée dans le chapitre 2, de la métropole qui extrait les *caractéristiques* (ou *paramètres*) principales à intégrer dans notre approche par la création d'*archétypes*. Face aux progrès réalisés dans les domaines informatiques, un grand nombre de données sont aujourd'hui disponibles autour des villes (section I du chapitre 2). La technique classique des *archétypes* permet de rassembler un grand nombre d'objets en quelques éléments représentatifs (section II du même chapitre). Nous appliquerons alors ce principe après avoir sélectionné les données les plus pertinentes pour notre construction (section III) pour construire deux familles d'archétypes, une de formes urbaines – c'est-à-dire d'organisations spatiales – d'une part, et une autre de bâtiments d'autre part (section IV).

Après la présentation de ces deux ensembles d'archétypes, nous décrirons notre modèle prospectif, que nous avons appelé TIMES-URBAN, pour la métropole de Bordeaux et la construction de scénarios prospectifs pour enrichir le débat autour de la ville *future* (chapitre 3) en nous attardant d'abord sur son organisation (section I) avant de détailler nos méthodes de projection spatiale utilisées au sein de deux nouveaux modèles, URBAN-SPATIALIZER et URBAN-TEMPÊST pour construire des résultats plus facilement visualisables et communicables (sections II et III). Nous en décrirons les résultats dans le dernier chapitre (chapitre 4) en proposant trois scénarios prospectifs principaux.

Chapitre 2

La création d'archétypes comme description quantitative de la ville



Où l'on crée une représentation numérique de la ville de Bordeaux...

Ce deuxième chapitre se penche sur l'extraction d'informations quantitatives et la création d'*archétypes* pour la représentation, dans notre modèle prospectif, des objets urbains (*formes urbaines* et *bâtiments* séparément) dont nous souhaitons étudier l'évolution.

Nous commencerons par regarder le contexte dans lequel s'inscrit cette approche, tant sur les développements récents autour des sciences de la donnée, que par rapport aux différentes études existantes dans la littérature scientifique sur la ville (section I). Nous verrons que ces résultats encouragent l'utilisation d'archétypes et nous proposerons alors, forts des leçons des études consultées et des échanges avec les urbanistes, une méthodologie de définition d'archétypes contribuant à la construction de notre modèle prospectif (section II). Après avoir établi une liste de paramètres que nous utilisons pour caractériser formes urbaines et bâtiments (section III), nous présenterons enfin les résultats de l'application de cette démarche au territoire étudié pendant ce travail de thèse, la métropole de Bordeaux (section IV).

Par la suite, nous utiliserons le terme d'*archétypes* pour désigner les objets représentatifs créés, et indifféremment ceux de *paramètres* ou de *caractéristiques* pour les éléments quantitatifs rassemblés. Les formes urbaines d'une part et les bâtiments d'autre part sont traités séparément.

I. La ville et les données

Notre méthode originale de construction d'archétypes de *formes urbaines* et de *bâtiments* s'insère dans les récents développements autour des données urbaines et de leur manipulation.

I.1. Un monde de la donnée

Ce début de XXI^{ème} siècle a été notamment marqué dans les domaines scientifiques par l'essor des sciences de la donnée : récupération, création, analyse, classification, clustering, machine-learning, réseaux de neurones… Les mots clés n'en finissent plus de fleurir et de servir de caution « innovation » à des approches variées et parfois éloignées des fondamentaux des disciplines auxquelles ils font référence.

Il est possible de séparer la révolution informatique autour de la donnée en deux axes distincts mais fortement liés : celui de la *mise-à-disposition croissante d'informations* chiffrées ou qualitatives (notamment par le mouvement des *données ouvertes* ou de l'*open data*) sur des domaines divers et de plus en plus nombreux d'une part, et celui sur les *techniques*, *algorithmes* et approches employés et développés d'autre part. Ces deux changements importants et mondiaux ont été permis ou en tout cas facilités par les améliorations successives des outils de calcul et des moyens de stockage informatiques (par exemple, par la continuelle hausse des performances des processeurs et l'utilisation des GPU[1]), ainsi que par ce

1. *GPU* ou *Graphics Processing Unit*, ou encore *processeur graphique*, c'est-à-dire un circuit intégré

qu'est devenu Internet aujourd'hui et aux possibilités d'échanges, auparavant inimaginables, ainsi permises.

I.1.a. Des révolutions informatiques bien intégrées dans les méthodes scientifiques

Que ce soit du fait des réseaux sociaux, de l'ouverture ou de la mise en place de certaines bases publiques, du lancement de projets dédiés à leur production, les données sembles être présentes partout et leur usage perce en particulier dans la recherche scientifique.

Certaines sciences commençeraient-elles à voir le bout de ce qu'elles pouvaient faire avec les moyens expérimentaux jusque-là disponibles ? Somme toute non, car on peut constater que le travail des scientifiques dans les domaines concernés n'a pas été affecté dans sa nature mais a simplement changé de méthodes. Pour prendre un exemple concret, on peut se pencher sur le cas de la physique fondamentale : la plupart des gigantesques expériences aujourd'hui développées (le LHC du CERN, les interféromètres Virgo et LIGO, les observatoires à neutrino parmi d'autres) ont confirmé des théories qui existaient pour beaucoup depuis le début du XX$^{\text{ème}}$ siècle et se sont très largement appuyées sur de l'analyse des masses considérables de données produites par ces systèmes (le LHC produit ainsi 30 pétaoctets par an [2]). La science théorique continue d'avancer mais les développements récents autour de l'informatique et de la manipulation des données permettent de progresser sur des questions qui semblent aujourd'hui difficilement tranchables autrement (la physique des particules pour le LHC et les détecteurs à neutrino, et les ondes gravitationnelles pour Virgo et LIGO par exemple). Les méthodes expérimentales ont ainsi bien évolué [3] (voire été révolutionnées pour partie).

Est-ce au contraire parce que les nouveaux moyens se développant ont permis de se poser de nouvelles questions qui ont pris une place importante ? Ou simplement parce que la prolifération de données accessibles a suscité le besoin de leur exploitation ? Ces deux interprétations sont davantage valides : les découvertes nombreuses dans les techniques liées à la manipulation des données ont conduit à des avancées significatives, dans la reconnaissance d'images par exemple. Ainsi, depuis plus d'une trentaine d'années, de nombreuses applica-

spécialisé dans les calculs relatifs à l'affichage, au rendu visuel, et plus généralement aux images et aux vidéos. Présents sur des cartes graphiques de plus en plus puissantes, ils sont très utilisés par les chercheurs et entreprises utilisant des réseaux de neurones car bien plus efficaces que les classiques CPU (ou *Central Processing Unit*) et leur application aux réseaux de neurones a marqué un véritable jalon dans la recherche et l'utilisation de ces techniques [Dsouza (2020) et Steinkraus et al. (2005)].

2. 30 pétaoctets, c'est-à-dire 10^{15} octets ou encore $1\,024 \times 1\,024$ gigaoctets ou encore 1 024 teraoctets, soit « 1,2 million de disques Blu-ray, ce qui représente 250 années de vidéo haute définition » d'après le site officiel du LHC : https://home.cern/fr/resources/faqs/facts-and-figures-about-lhc (consulté le 6 décembre 2020).

3. On peut constater qu'une part importante des équipes en charge des découvertes récentes sur le boson de Higgs ou plus généralement des personnes travaillant au Large Hadron Collider (LHC) du CERN est constituée d'informaticiens et d'informaticiennes là où les équipes de télescopes ou de laboratoires comprenaient – et comprennent encore – des techniciens et techniciennes d'autres disciplines que la branche des sciences étudiée. Leur rôle capital au sein des entités de recherche n'est plus à prouver [Barley et Bechky (1994)] malgré leur invisibilité sur la scène publique de la recherche [Shapin (1989)].

tions [4] ont ainsi vu le jour dans les domaines de la médecine (pour l'amélioration des techniques d'imagerie, de détection de pathologies et de diagnostics) [Fourcade et Khonsari (2019) et Shi et He (2010)], de l'étude de la planète (via l'imagerie satellite) [Carlson et Traci Arthur (2000) et Voigt et al. (2007)], de la sécurité (reconnaissance de visages sur les caméras de sécurité) [Banarse et al. (2000) et Bondi et al. (2017)], des jeux vidéos et films (par la numérisation des visages d'acteurs) [Barbič et al. (2004), Gall et al. (2009) et Menache (2000)] ou encore de la maintenance prédictive [Moselhi et Shehab-Eldeen (2000)]. Les algorithmes d'intelligence artificielle sont utilisés pour produire des véhicules autonomes [Nascimento et al. (2019) et Veres et al. (2011)], créer des moteurs de recherche [van Lent et Laird (1999)], développer la robotique [He et al. (2016), He et Dong (2018) et Saridis (1983)], parfaire les interfaces homme-machine [Lisetti et Schiano (2000), Sullivan et al. (1994) et Winograd (2006)], et sur bien d'autres sujets encore [Ezziane (2006), Leo Kumar (2017), Mellit et Kalogirou (2008), Nourani et al. (2014) et Shahin (2016)]. Les données fournissent de nouveaux services dans la recherche sur la ville, notamment autour de la smart-city efficace [Al Nuaimi et al. (2015)], de la croissance urbaine [Gao et al. (2017)], du tourisme, de l'attractivité et de l'héritage culturel d'un lieu [Ginzarly et al. (2019) et Lucchini et al. (2013)], sur les profils de déplacement des individus [Liao (2018)], sur la consommation d'énergie pour le chauffage [Nouvel et al. (2017)], etc.

De nouvelles applications ne cessent de voir le jour et il devient de plus en plus fréquent de voir des projets labellisés *smart*, *data-oriented*, *machine-learning* et ce avec plus ou moins de légitimité. Il convient en effet de nuancer les commentaires dithyrambiques fréquemment associés à ces avancées [Boyd et Crawford (2012)] : derrière certaines de ces notions se cachent tantôt de véritables révolutions scientifiques, techniques ou technologiques (comme nous l'avons vu autour de la physique fondamentale), tantôt de simples remises au goût du jour de pratiques éprouvées (en statistique par exemple). Les méthodes de réduction de dimension et d'études de corrélation utilisées dans cette thèse sont par exemple connues depuis de nombreuses décennies [Wold et al. (1987)] mais ont été réactualisées par la prolifération de données rendues publiques, prouvant leur utilité par la multiplication des cas d'application et leur efficacité à ces occasions [Granato et Ares (2014), Hernandez et Mendez (2018) et Sanguansat (2012)]. Le cas de la ville est une illustration convenable de cette ouverture des données [Barbosa et al. (2014)] et des nouveaux cas potentiels d'applications multiples qu'offrent ces techniques [Allix (2019), Lecomte (2015) et Rolland (2016)].

Problèmes d'interprétabilité et de respect de la vie privée

Cependant, derrière certaines promesses liées à de telles approches, se trouvent parfois un manque de recul théorique et des incompréhensions importantes des phénomènes en jeu [Hart et Wyatt (1990) et Shwartz-Ziv et Tishby (2017)] [5].

4. On ne cite ici que certains articles ayant marqué leur domaine ou illustrant l'application en question. Le grand nombre de travaux scientifiques relatifs à ce sujet atteste de l'intérêt de ces méthodes. La requête `"machine learning" AND "review" AND "applications"` dans le moteur de recherche de `Science Direct` retourne à elle seule plus de 60 000 résultats (en décembre 2020).

5. Ces deux articles ont été publiés à près de trente ans d'écart, ce qui souligne les améliorations possibles dans ce domaine.

En particulier, c'est le phénomène de la *black box*, encore dénommé problème d'*interprétabilité*, qui est souvent érigé comme une des limitations principales des réseaux de neurones et des systèmes similaires de *machine-learning* [6]. Les mécanismes mis à l'œuvre par ces outils ont permis récemment de véritables prouesses (parfois largement médiatisées comme la victoire d'un ordinateur au go [Le Monde (2016, 2017)]) mais ne sont pas encore complètement appréhendés : les réseaux comprennent-ils réellement les données fournies, pourquoi sont-ils aussi efficaces dans certaines situations et inopérants dans d'autres, quelle structure de réseau est *a priori* la meilleure pour un problème donné, etc. À ces problématiques s'ajoutent des phénomènes de biais induits dans les modèles par les ensembles de données d'entraînement qui imposent alors la mise en place de mécanismes de corrections [Jiang et Nachum (2020) et Mac Namee et al. (2002)]. Les réseaux de neurones et autres outils similaires sont donc souvent des solutions extrêmement efficaces et ne sont alors pas toujours utilisés avec les précautions qui s'imposent. Des efforts continuent heureusement d'être faits sur l'interprétabilité des réseaux, ainsi que sur la vulgarisation de telles techniques auprès du public et surtout auprès des personnes en charge de choix stratégiques ou de décisions politiques impactées par les limites et le fonctionnement de tels systèmes [Alvarez Melis et Jaakkola (2018) et Dong et al. (2017)].

Au-delà des besoins et du recours presque systématisé aux données se dissimulent également des problématiques extrêmement sensibles de respect des données privées et donc par extension des individus [7]. En effet, de nombreux travaux de recherche ou outils s'appuient sur des données librement accessibles, fournies par des entités publiques (villes, régions, gouvernements) ou privées (entreprises, associations). Un des exemples très classique est le cas de Twitter (ou des réseaux sociaux en général) qui donne accès à des sous-ensembles « anonymisés » de leurs données gratuitement. Le problème tient au fait que l'anonymisation n'est jamais parfaite et les informations de géolocalisation suffisent bien souvent à identifier ou à s'approcher très finement de l'identité des personnes dont les données ont été partagées, tout en sachant que dans bien des cas, les utilisateurs des différentes plateformes ne sont pas au courant ou n'ont pas consenti au partage de leurs informations personnelles. Cette situation a en partie évolué depuis la mise en place du Réglement Général sur la Protection des Données (RGPD) qui impose de demander le consentement actif des utilisateurs à la collecte de leurs données personnelles [8].

Pour conclure cette brève contextualisation du monde de la donnée, il convient de garder en tête les avantages et inconvénients du machine-learning et de l'utilisation de la science des données, et de manipuler prudemment leurs résultats.

6. C'est notamment le cas dans le débat sur l'éthique des intelligences artificielles. On pourra se référer au billet de Maubant (2020) qui dresse un portrait poussé et nuancé autour des deux questions, distinctes, de la transparence et de l'explicabilité des réseaux de neurones et des outils de *machine learning* en général.

7. Comme mentionné précédemment, les scandales récents – dont le plus connu est Facebook et Cambridge Analytica [Kozlowska (2018)] – font survenir un peu plus dans le débat public ces problématiques. On pourra se référer à la section III.1.b du chapitre 1, p. 37, où sont notamment les établies les limites de la *smart city* pour plus de détails sur ces problématiques.

8. Le RGPD reste toutefois une réponse légale plus que technique aux problèmes mentionnés précédemment. Il ne s'applique de plus qu'au périmètre de l'Union Européenne.

I.1.b. Les données comme conciliation avec la ville existante

Une des difficultés majeures avec la mise en place d'une ville plus soutenable, plus durable, est qu'il faut agir principalement sur des bâtiments et des infrastructures existants : peu de villes se construisent en Europe aujourd'hui à partir de rien [9] ou en faisant table rase de quartiers entiers [Emelianoff (2004)]. Cette lente transformation des milieux urbains est d'ailleurs naturelle, la ville « *doit s'accoucher d'elle-même* » [Orsenna et Gilsoul (2018)].

Il est bien sûr possible de profiter de rénovations de bâtiments ou de transformations de quartiers pour obtenir des résultats plus ambitieux. L'utilisation de données quantitatives et la création d'un double numérique ou d'une base de données relative à une ville, à un moment donné de son histoire, contribuent à assurer la continuité entre l'existant et le projeté, puisque les données offrent alors un regard relativement neutre sur la situation de la ville avant projet ; et cela, quel que soit l'état de la zone concernée.

L'exemple de la *Jallère* est parlant à cet égard. Cette zone située au nord de la ville de Bordeaux et de ses bassins à flot est une zone d'activités coincée entre les jalles [10] et les zones humides du nord de la ville, le récent stade de football, le parc des expositions, le nouveau quartier de Ginko et Bordeaux Lac, la zone des Bacalans et la Garonne. En partie délaissée par le départ de certains employeurs importants, une portion non négligeable des terrains risque de devenir une friche industrielle par l'abandon d'activités productives. Ce territoire est également caractérisé par la présence d'importantes zones humides, riches en faune et en flore. Le projet initial de la ville était donc de faire en sorte de transformer le quartier pour y loger une partie de la population suite à la forte croissance démographique de la dernière décennie et ainsi désengorger encore un peu plus les centres villes. Un potentiel prolongement d'une des lignes de tramway donnerait accès à cette zone et limiterait l'impact de son développement sur les problèmes de trafic de la rocade bordelaise. L'étude de faisabilité et de premières propositions ont ainsi été confiées à ANMA qui a fait le pari original de proposer un quartier fortement inséré dans la nature en conservant globalement le réseau de routes actuel, prévu initialement pour des îlots importants de locaux professionnels, et en construisant ainsi des formes d'îles entourées de verdure. Pour ce faire, l'agence s'est appuyée sur un rapport archéogéographique et sur des études sur les conditions de transport, sur la faune et la flore locales… La figure 2.1 est une page d'un document de travail soulignant trois étapes importantes de l'histoire du quartier et qui illustre les différentes structures qui soustendent l'organisation actuelle du quartier : on y comprend l'importance de faire appel à des études historiques et archéogéographiques pour mieux appréhender les logiques d'aménagement à l'origine du visage contemporain de la zone.

Il faut donc bâtir autour, au milieu, sur, sous, ce qui nécessite de bien connaître la situation initiale, c'est-à-dire une compréhension fine du territoire étudié, notamment par une récupération de données et une analyse de celles-ci comme cela a été le cas pour l'exemple de la Jallère. Le recours à une description quantitative

9. Ce n'est pas le cas en Chine ou sur le continent africain où les villes « *sortent de nulle part* » [Périnel (2015) et Ruiz (2013)]. Et les méthodes de construction y évoluent rapidement, notamment avec l'arrivée des enjeux environnementaux [Henriot (2015)].

10. Le mot *jalle* est un terme du Médoc désignant les cours d'eau.

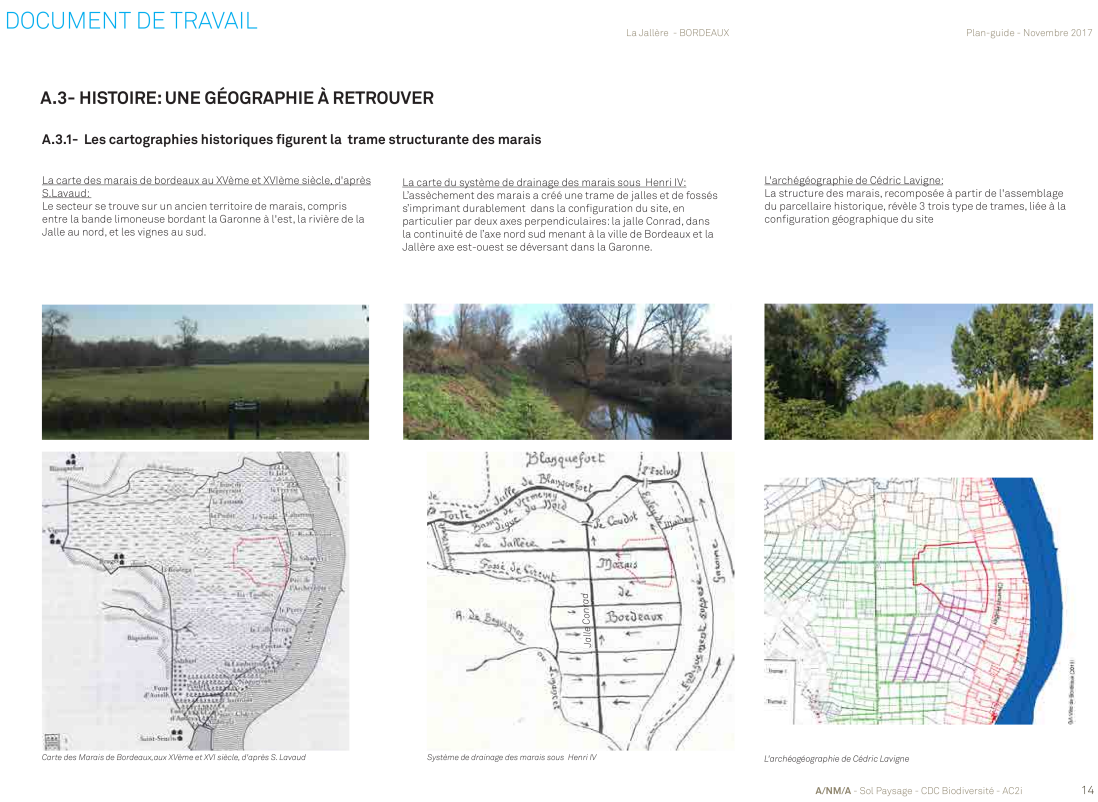


FIGURE 2.1 – Exemple de page d'un document de travail de l'agence sur le quartier de la Jallère et son histoire (source : ANMA).

poussée dans les domaines considérés est alors précieuse.

I.2. Quelles données pour la ville ?

Il est possible de séparer le milieu urbain en plusieurs catégories. Historiquement, ont souvent été différenciées la ville *physique* (ou « *urbs* » en latin), la ville *sociale* et *économique* (ou « *civitas* » en latin) et la ville *politique* (ou « *polis* » en grec) [CAGLIONI (2019)]. Chacune de ces dimensions est intimement liée aux deux autres tout en disposant de nombreuses caractéristiques internes. MINEAU (2003) propose une séparation des données plus simple : *naturelles* (site, sous-sol, contraintes paysagères), *artificielles* (infrastructures construites de la ville) et *immatérielles* (indicateurs sur les habitants) [MINEAU (2003)]. Des deux auteurs on peut alors tirer une séparation entre la localisation dans un environnement, les objets physiques, la vie des citoyens et l'organisation politique, chacun de ces domaines rassemblant de nombreux éléments. De façon non exhaustive, on trouve donc par exemple les données suivantes, réparties en plusieurs catégories inspirées de ces grands thèmes :

- **Géographiques**, **géologiques** et **hydrographiques** : localisation dans le pays, reliefs, composition des sols, présence de cours et de pièces d'eau ;
- **Physiques** : bâtiments, routes, arbres, parkings, infrastructures techniques (réseaux) ;
- **Flux** : transports et mobilité, marchandises, matériaux ;

- **Sociales** : population, démographie, inégalités, emplois, services publics ;
- **Economiques** : acteurs industriels, principaux employeurs, bassins d'emplois, secteurs économiques ;
- **Politiques** : rapports de force (économique ou politique), acteurs publics et privés dans la gestion et la planification de la ville, politiques locales mises en œuvre, zonage, maîtrise du foncier ;
- **Historiques** [11] : traces archéologiques, quartiers historiques, bâtiments classés ou inscrits, marques du passé sur l'organisation ;
- **Immatérielles** : culture, perception d'une ville, d'un quartier, d'une unité.

De la même façon, on peut séparer les principales sources de données urbaines entre acteurs nationaux, régionaux et locaux, entre acteurs publics et privés, entre services gratuits et plateformes payantes [12].

La difficulté à obtenir un ensemble complet, exhaustif de données sur un territoire précis peut sembler frustrant et particulièrement gênant dans une approche de modélisation ou de simulation. Le principe de « ville intelligente » (présenté dans le chapitre 1 à la section III.1.b, p. 37) consiste pour certains acteurs (en particulier privés) à ajouter un grand nombre de capteurs qui donnent en temps réel un large panel d'informations (sur le trafic, le déplacement des individus, l'utilisation des réseaux, commerces et bureaux, le besoin d'approvisionnement, etc.) [Atlantic (2018)].

L'écart semble toutefois incompressible entre cette ville instrumentée [13] et la ville réelle [14]. Il est particulièrement mis en évidence par l'existence des données dites

11. La construction et la vie actuelle des villes est nécessairement influencée par son histoire [Magail (2019)], de façon visible à travers les quartiers historiques ou certains tracés emblématiques, mais également de façon invisible. Nous avons déjà mentionné (voir section III.2 du chapitre 1, p. 44) l'archéogéographie en tant que discipline mise à contribution pour l'étude des structures historiques de la ville. Plus généralement, les études climatiques réalisées par des géologues ou autres scientifiques de la terre se penchent nécessairement sur des questions d'histoire [Le Treut (2013)].

12. La liste citée ci-dessus des informations caractérisant une ville peut être renouvelée en classant cette fois-ci non pas par ensemble de données mais par créateur de l'information (au sens d'*origine de*) ou par fournisseur de la donnée (au sens de *acteur mettant à disposition*). Cela permet d'évaluer les organismes à contacter afin de récupérer l'ensemble des données dans le cas de l'application de l'exercice à un autre territoire.

13. Ou instrumentalisée au service des grandes entreprises [Caglioni (2019)] ? C'est en tout cas la version passionnante imaginée par Alain Damasio dans son ouvrage *Les furtifs* où l'État et les collectivités territoriales ont laissé la place – se sont vendues pour être exact – à des multinationales, Paris devenant Paris-LVMH par exemple ou la ville d'Orange étant achetée par l'entreprise éponyme. La ville est alors entièrement réorganisée, redistribuée, privatisée selon l'abonnement des citoyens, et propose de nombreux moyens de vendre aux habitants tout au long de leur journée en agrémentant les espaces publics de publicités auprès desquelles nos écrans feraient pâle figure [Damasio (2019)]. Cette ville imaginaire dystopique est une vision prolongeant à l'extrême les développements actuels où les grandes entreprises (de l'informatique, de l'information, de l'énergie ou même de la construction) sont particulièrement proactives du fait de leur puissance économique, avec les projets proposés par les GAFAM de nouvelles villes intelligentes (que nous avons traité plus en détail dans la section III.1.b du chapitre 1, p. 37) [Caglioni (2019) et Taveau (2017)]. Plutôt que son caractère potentiellement prémonitoire qu'il est difficile d'évaluer, nous retenons d'une telle vision dystopique l'importance renouvelée d'un espace public et d'une autorité publique « gardienne » de l'égalité et de la liberté, préoccupée plus par le bonheur de ses citoyens que par une rentabilité.

14. Réelle au sens de vécue par ses habitants, habitées par des humains. C'est avant tout l'objectif premier d'une ville : non pas de construire des bâtiments publics, des logements, des routes, des espaces naturels, des hôpitaux, des écoles, des locaux d'entreprises mais bien de permettre à des hommes et des femmes d'y vivre [Caglioni (2019) et New York Magazine (2018)].

immatérielles sur la vision du milieu urbain par ses habitants. Par exemple, la caractérisation des micro-climats urbains peut être mise en relation avec la perception des piétons sur leur confort thermique afin d'évaluer l'efficacité de l'organisation des espaces publics quant à la sensation de chaleur [Sharmin et al. (2015)]. Le ressenti de la densité est parfois également différente de la densité réelle de quartiers, cette conclusion pouvant aiguiller vers des formes urbaines plus appréciées et donc plus appréciables [APUR (2003)]. La définition des quartiers, quant à elle, peut être questionnée selon les avis et les vues des habitants (permettant alors d'envisager de réviser les cartes de quartiers généralement initialement basées sur des données de recensement) [Coulton et al. (2001)]. Les vertus de la densité sont ainsi, d'après Saga Cité (2011), « malmenées » par la mauvaise perception des habitants qui associent souvent forte densité et tours : travailler sur la communication auprès du public semble alors plus *urgent* que l'amélioration technique des bâtiments [Saga Cité (2011)]. Recueillir ce ressenti est possible par des entretiens ou des enquêtes permettant l'intégration du sentiment des habitants dans des exercices de modélisation.

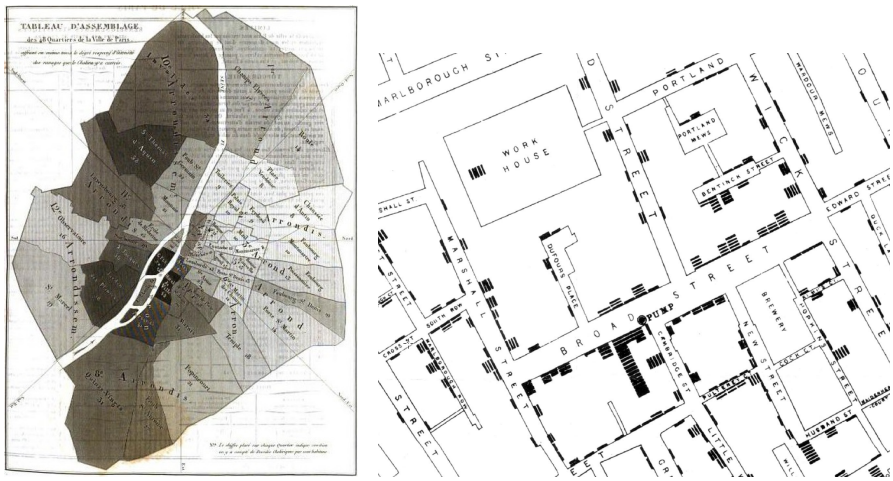
Ces quelques éléments sur l'instrumentation des villes nous rappellent que l'objet que nous tentons de représenter, que nous cherchons à appréhender holistiquement, et dont nous voulons construire un double informatique, ne peut pas être réduit aux seules valeurs quantitatives et qualitatives visibles et accessibles. Les données ne *sont* pas la ville mais permettent d'en créer une représentation informatique dont les limites sont connues : c'est une conclusion qu'il faudra garder à l'esprit tout au long de la modélisation [15].

Toutes ces données ne sont en outre pas nécessaires à l'approche que nous proposons ici. Bien que l'urbaniste soit peut-être appelé à cotoyer toutes ces dimensions, l'exercice de modélisation impose de se restreindre à celles sur lesquelles l'aménagement a un impact concret immédiat : pour reprendre la décomposition de Mineau (2003), le travail de développement du territoire urbain s'applique à la ville artificielle ; pour reprendre nos catégories, ce sont les données *physiques*, *économiques* et *sociales* qui nous intéressent plus directement. Or, il se trouve que les données de la ville sont très largement spatiales, l'espace étant lui-même intrinséquement une construction sociale comme une influence de la vie en ville [Löw (2015)]. Plus que les données en elles-mêmes qui, nous l'avons vu ci-dessus, sont multiples, le prisme des outils permet une étude plus organisée du rapport des villes aux données.

Pour entrer plus en détail dans l'utilisation des données autour de la question de la ville, nous allons donc dans un premier temps nous intéresser à un bref historique des données urbaines spatiales (sous-section I.2.a) avant de nous pencher plus précisément sur les usages actuels de ces outils de stockage et de manipulation dans le cadre de l'urbanisme d'une part (sous-section I.2.b) et de la modélisation d'autre part (sous-section I.2.c).

15. L'affirmation de cette conclusion certes triviale nous semble nécessaire pour insister sur la *modalisation* de la portée de la *modélisation* en tant qu'information et non objet fini : de la même façon que la prospective ne calcule pas le futur et ne prétend pas prévoir l'avenir, l'utilisation de données et *a fortiori* la création d'archétypes ne fournissent pas une vision parfaite de la ville mais bien une représentation spécifiquement associée à un objectif et des hypothèses.

I.2.a. Données urbaines spatiales dans l'histoire des villes



(A) Carte des arrondissements de Paris de Charles Picquet de 1832.

(B) Extrait de la carte du quartier de Soho de John Snow, version de 1854.

FIGURE 2.2 – Premiers exemples de données géographiques spatialisées.

Élément important dans la conception des villes et la mise en place de descriptions cartographiques enrichies de données non physiques (ou *a priori* non spatiales), le rapport à la cartographie a marqué un jalon dans l'histoire des villes. Les références historiques les plus fréquemment citées [TATE (2018)] sont :

- celle de la carte des quartiers de Paris réalisée par Charles Picquet (cf. 2.2a) dans le « rapport sur la marche et les effets du choléra dans Paris et le département de la Seine » en 1832 colorant les zones de la ville d'une teinte plus ou moins foncée en fonction de l'impact de l'épidémie [BENOISTON DE CHATEAUNEUF et al. (1834)],
- celle du quartier de Soho de Londres de John Snow (cf. 2.2b), établie vers 1854, et représentant également la répartition des décès dus au choléra en ajoutant cette fois des traits sur la carte à chaque cas recensé [SNOW (1854)],
- ainsi que celle de la ville de Paris, produite par Jacques Bertillon à la fin du XIX^{ème} siècle.

Ces balbutiements cartographiques sont considérés comme les débuts des Systèmes d'Information Géographique[16] (ou *SIG*) : les cartes créées ajoutent de l'information à la simple représentation spatiale des lieux, et ce principe de base, novateur à l'époque, a pu être grandement perfectionné depuis le XIX^{ème} siècle. La représentation spatiale d'un territoire et le croisement avec d'autres données (dans les cas cités précédemment, la répartition des malades ou les quartiers à risque) donnent en effet accès à des analyses et à une mise en relation d'informations non triviales.

16. Les Systèmes d'Information Géographique ou *SIG* sont des « *système[s] d'information conçu[s] pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques* » [WIKIPÉDIA (2020k)]. Ils sont à différencier de la géomatique en ce qu'ils rassemblent des outils tandis que la géomatique est plus largement une discipline technique. Cette dernière est définie comme « *regroup[ant] l'ensemble des outils et méthodes permettant d'acquérir, de représenter, d'analyser et d'intégrer des données géographiques* » [WIKIPÉDIA (2020h)].

L'arrivée des outils informatiques dans la deuxième moitié du XX^{ème} siècle marque finalement l'essor des SIG et leur adoption par une grande partie des acteurs urbains. En particulier, les années 60 voient l'entrée des problématiques de données spatiales dans le monde des ordinateurs. Tomlinson (1967) peut être considéré comme l'un des pionniers de cette approche par la création du Système d'Information Géographique du Canada (ou *Canada Geographic Information System*) vu par beaucoup comme le premier SIG [17] [The Bloomsbury Geographer (2014)]. La technologie et ses applications continuent de se développer dans les années 70 et 80 alors que des agences gouvernementales (l'armée par exemple, le cadastre ou d'autres besoins topographiques), des entreprises (comme IBM), des collectivités territoriales (on cite parfois la ville de Los Angeles) mais aussi des universités (dont Harvard) s'emparent du sujet [Dempsey (2012), Tate (2018) et The Economist (2019)]. Le terme SIG (ou *GIS* en anglais pour *Geographic Information Systems*) apparaît pour la première fois en 1965 dans un rapport de Dacey et Marble du département de géographie de l'université de l'Illinois et a été adopté par l'ensemble des professions depuis [Dempsey (2014)].

La fin des années 80 et la décennie qui suivit voient des avancées majeures dans le domaine des SIG avec l'apparition de nombreux logiciels (dont ArcView qui deviendra plus tard ArcGIS développé par l'entreprise ESRI – fondée quant à elle en 1969) et d'applications grands publics de données géographiques informatisées, avec le GPS en 1983 par exemple [Dempsey (2012) et Service SIG Territorial de la Collectivité de Corse (2014)]. Le développement de l'imagerie par satellites et l'amélioration constante des moyens informatiques (mémoire, puissance de calcul, mise en réseau, etc.) contribuent à la progression des SIG et permettent une forme de démocratisation de leur usage [Dempsey (2014) et Tate (2018)].

I.2.b. De l'usage des SIG en urbanisme

Du côté des collectivités territoriales

Sans connaître exactement l'étendue de l'utilisation des SIG dans le monde ou dans les services urbains, il est toutefois possible de reconnaître les services potentiels que peuvent rendre ces outils dans la gestion d'une ville, par exemple pour la gestion des réseaux (d'eau, d'électricité), du cadastre et des parcelles, des lignes de transport en commun, des risques naturels et industriels, des espaces naturels, des sites historiques, pour la conception et le maintien des plans locaux d'urbanisme… En témoignent par exemple la diversité des données mises à disposition sur le site d'*open data* de la métropole de Bordeaux [18], ou sur un grand nombre de sites de grandes villes en France [19] suite à l'application par celles-ci de la loi pour une République numérique de 2016. Cette loi a imposé aux collectivités territoriales de plus de 3 500 habitants de publier sur un site ouvert « les bases de données, mises à jour de façon régulière, qu'elles produisent ou qu'elles reçoivent » et « les données, mises à jour de façon régulière, dont la publication présente

17. Il est amusant de noter que cette première application réelle informatisée de systèmes de données géographiques concerne l'occupation des sols, tout comme notre approche.

18. Voir https://opendata.bordeaux-metropole.fr (consulté le 3 décembre 2020).

19. On pourra par exemple citer la métropole de Nantes (https://data.nantesmetropole.fr/ - consultée le 14 décembre 2020) avec 884 jeux de données ou celle de Rennes (https://data.rennesmetropole.fr/ - consultée le 14 décembre 2020) avec 383 entrées.

un intérêt économique, social, sanitaire ou environnemental » [Lausson (2016) et "LOI N° 2016-1321 Du 7 Octobre 2016 Pour Une République Numérique (1)" (2016)]. Quand le bilan a été fait à la fin du délai fourni par la loi pour une République Numérique à la fin de l'année 2018, seul un nombre faible de collectivités concernées (environ 8 %) avait mis en ligne un jeu de données [Mazon (2018)]. Cela témoigne du coût financier et de la difficulté à former les personnels des collectivités (particulièrement celles plus modestes) à de nouveaux outils [Albert (2018) et Blanc (2013)].

Du côté des agences privées

La profession d'architecte (et plus généralement la construction de bâtiments) connaît depuis quelques années une petite révolution avec l'apparition du BIM (ou *Building Information Modeling* [20]) mais les urbanistes d'agences privées, pourtant habitués à travailler sur des plans (processus inhérent à leur profession), restent finalement souvent éloignés des SIG en France.

En effet, les SIG commencent seulement à percer dans la profession (en tout cas dans les agences privées), produisant des résultats très novateurs et surprenants [21]. Dubois et al. (2016) remarquent ainsi l'usage fréquent de « *guides méthodologiques* » mais jamais de logiciels de SIG ou d'outils de simulation numérique, ce que confirme notre expérience au sein de l'agence ANMA [Dubois et al. (2016)]. Est-ce parce que, largement issus du monde de l'architecture, ils n'ont pas eu besoin au cours de leur formation ou des débuts de leurs carrières de ces systèmes plutôt adaptés à des échelles larges ? Ou encore est-ce lié à la mise à disposition tardive de données publiques telles que le cadastre (en 2007) [Bertrand (2008)] ou les valeurs foncières [Clozel (2019) et Errard (2019)], tandis que d'autres restent payantes pour les acteurs privés (BDTOPO [22] de l'IGN par exemple), obligeant alors à se tourner vers des sources libres dont la célèbre initiative coopérative *OpenStreetMap* ? Ou peut-être les besoins de précision et d'automatisation de la profession ne sont-ils pas encore importants ou intégrés dans les pistes d'amélioration et d'optimisation de leur travail, si tant est que les urbanistes raisonnent en termes d'efficacité [23]) ?

20. Le BIM consiste principalement en l'idée de mise en commun par l'ensemble des acteurs (architectes, bureaux d'étude, pouvoirs publics, entreprises de construction, etc.) de la construction d'un bâtiment, d'un ouvrage ou d'une infrastructure, d'une *maquette numérique* comprenant toutes les informations nécessaires de la conception à la maintenance. L'appellation *BIM* désigne souvent par extension ce même fichier numérique [Wikipédia (2020e)]. Il s'agit donc à la fois d'un système d'information et d'une nouvelle façon de procéder lors des phases de dessin, le domaine de l'architecture ayant normalement déjà connu en France une première transition numérique dans les années 1990-2000 [Hochscheid et Halin (2018)]. Nous utilisons ici le terme *révolution* pour désigner cette tendance qui date déjà de quelques années car elle peut être ressentie comme telle par la profession [Canovas (2018)].

21. Par exemple, le projet *Bâtiville* s'est attaché à la conception d'un îlot urbain optimisé à l'aide de nombreux outils tels que ceux mentionnés ici [Greset et al. (2016)]. On notera toutefois qu'une partie des étapes nécessaires sont encore manuelles.

22. *BDTOPO* ou Base de Données TOPOgraphique.

23. Ils le font peut-être de plus en plus avec les resserrements budgétaires et l'inextensibilité des vingt-quatre heures quotidiennes malgré l'acceptation dans la profession de plages de travail hors normes. L'expression « *être charette* » ou « *faire charette* » est ainsi née de l'utilisation de charettes de charbonnier pour amener au dernier moment, à travers les rues de Paris, les planches devant être exposées à l'École des Beaux-Arts de Paris [Wikipédia (2020f)]. Il est possible d'y voir une référence sous-jacente au labeur plus populaire des paysans ou des cantonniers, eux aussi soumis aux délais de la nature, souvent bien plus imprévisibles [Noudelmann (2009)]. Encore utilisée de nos jours, elle désigne le fait qu'un projet doit être terminé dans un délai très (trop ?) court et que pour

Chacun de ces facteurs entre en jeu : Dubois et al. (2016) notent le « besoin de ressources humaines qualifiées », le changement de méthodologie pratique que cela imposerait, ainsi que la difficulté à sélectionner parmi les nombreux outils existants celui ou ceux qui seraient les plus adaptés. Les urbanistes valorisent la simplicité, l'efficacité, la facilité d'utilisation, le design de l'interface, les capacités de simulation et les approches holistiques [Dubois et al. (2016)].

Les logiciels de SIG existant, dont le leader propriétaire sur le marché *ArcGIS*, ne sont pas forcément adaptés aux besoins pratiques et techniques du quotidien des urbanistes, malgré des tentatives récentes de rapprochement[24]. On cite notamment les problématiques d'échelles et de précision pour distinguer les besoins des urbanistes et des géomaticiens [Clozel (2011)]. Les urbanistes se servent le plus souvent de logiciels de DAO (*Dessin Assisté par Ordinateur*) comme *AutoCAD* ou *Revit* qui ont été enrichis au fur et à mesure des années et dont l'utilisation a été optimisée et parfaitement maîtrisée. Plusieurs arguments reviennent ainsi expliquant le peu d'usage de ces outils ou réfutant leur besoin : « analyse coûts-bénéfices des SIG, écueils institutionnels, problème de mise en œuvre, etc. » [Mineau (2003)] Les choses ont bien évolué depuis et on peut considérer que près de vingt ans après les diagnostics de Mineau (2003), les collectivités territoriales et les services de l'État se sont emparés, au moins partiellement, des SIG quand leur utilité avait été démontrée. Ainsi, de nombreuses villes mettent à disposition des données en temps réel de leurs services de transport, sur le budget municipal, les horaires des services publics, etc. [France (2013) et Laison et al. (2019)].

En résumé, les SIG ont tout à fait leur place dans le monde de l'urbanisme comme le montrent les premiers exemples d'application. Ils présentent en outre un réel potentiel d'automatisation d'une partie des tâches réalisées au sein des agences : des calculs sont refaits régulièrement et peuvent être remplacés par des requêtes sur des bases de données, des dessins sont faits manuellement via les logiciels de DAO alors que les structures sont souvent déjà référencées par l'IGN ou des initiatives libres (bâtiments, routes, végétation…). Néanmoins, du fait d'un manque de formation sur les SIG et les logiciels afférents, du fait d'un caractère trop généraliste des-dits logiciels, du fait d'une tension opérationnelle continue exercée sur les urbanistes rendant périlleux un pivot d'outils, du fait d'un coût non négligeable en ressources humaines et financières, les SIG peinent à rentrer dans la pratique de l'urbanisme de nombreuses agences. De même, les collectivités territoriales moins importantes en population rencontrent des problèmes similaires. Bien souvent, ce sont donc les services des métropoles et des grandes intercommunalités, ainsi que les bureaux d'études mis à contribution au cours

parvenir à remplir le contrat, des heures supplémentaires régulièrement nocturnes doivent y être consacrées (tout cela étant lié à la nécessité de répondre à des demandes sans cesse changeantes des clients, ou de mener de front de nombreux projets pour faire vivre une agence, les marges en urbanisme étant en outre relativement faibles comparées à celles des projets d'architecture). Cette formule, largement employée par les architectes – et *a fortiori* les urbanistes –, est une forme d'expression représentative (ou identifiante) de ces professions. Tout à fait assumée, elle a même donné lieu à la création d'un concours, d'un site collaboratif ou d'une agence éponymes. On comprendra, au regard de ce que cela dit de la profession, qu'il y ait peu de place pour les urbanistes, bien malgré eux, pour un temps de recherche et pour l'apprentissage de l'utilisation de nouveaux outils complexes mal adaptés à leur quotidien.

24. Nous avons ainsi assisté, au cours des périodes de travail effectuées au sein de l'agence ANMA, à des réunions avec des entreprises proposant des services de SIG et pu constater le peu d'adéquation des solutions existantes aux méthodes de travail et aux besoins des urbanistes.

de la conception des projets, qui manipulent des SIG en interne en remettant des cartes ou des données que les urbanistes mettent en forme et intègrent à leurs propositions. Pour autant, comme l'historique de l'essor des SIG sur les villes nous l'a exposé et comme les études scientifiques présentées dans la section suivante vont le montrer, l'usage des SIG mériterait d'être démocratisé plus généralement au sein de l'urbanisme. Ce genre d'outils peut ainsi fournir des supports de communication à la fois aux parties prenantes de l'élaboration de projets d'aménagement ou auprès du public [Clozel (2011)].

I.2.c. De l'usage des SIG dans la modélisation de la ville

Les études scientifiques mettant à profit des données sur la ville sont légion et la grande majorité d'entre elles s'appuient sur des données qualitatives ou quantitatives géographiques. Nous avons déjà mentionné à la section V.2.c du chapitre 1 que les SIG sont généralement mis à contribution dans deux cadres pour l'étude de la ville : en premier lieu, pour la *récupération et certains traitements des données*, et, en second lieu, pour la *visualisation des résultats*. La complexité de ces outils ainsi que les différences fondamentales de fonctionnement avec les approches habituelles d'optimisation rendent relativement rares, ou en tout cas ardues, les cas d'intégration totale des deux démarches [25].

Cependant, il existe suffisamment d'exemples pertinents pour parler de potentiel de couplage entre SIG et d'autres techniques. Quelle est alors la place méthodologique du SIG ? Tandis que certaines approches préfèrent passer par des formes de carte de contraintes [Ligmann-Zielinska et al. (2008)] ou par des systèmes d'association de plusieurs couches spatiales [Heiple et Sailor (2008)], d'autres incluent au cœur de leur modèle un système géographique pour s'assurer d'une *cohérence spatiale* comme cela peut être le cas pour l'évaluation du risque de pics de canicule ou d'îlots de chaleur urbains [Mavrogianni et al. (2009)] ou dans l'étude de réseaux [Samsatli et Samsatli (2018)]. Il est également possible d'associer l'usage d'un SIG avec des techniques d'optimisation, par exemple de *mixed-integer linear programming* pour la conception et l'utilisation de réseaux [Samsatli et Samsatli (2018)]. Une approche intéressante consiste à distribuer géographiquement dans un SIG les sorties d'un ou de plusieurs modèles précédents (MARKAL/LITE pour la chaîne énergétique, EMME/2 pour le trafic, etc.) [Fedra et al. (2000)]. Ce lien peut être un couplage plus ou moins fort [26], c'est-à-dire que des allers-retours peuvent être faits entre la technologie de répartition spatiale et celle d'optimisation des investissements (dont la convergence n'est donc pas garantie et nécessite une troisième itération prenant les décisions par une optimisation multi-objectifs) [Fedra et Haurie (1999)], ou qu'une itération unique peut être faite à partir des modèles d'optimisation. Ces exemples d'utilisation de résultats

25. L'optimisation théorique propose ainsi certaines approches s'apparentant à une représentation spatiale d'éléments ou permettant de figurer une distribution géographique : l'optimisation de réseaux, pour leur conception ou leur utilisation opérationnelle ; les systèmes à paramètres distribués [Fedra et Haurie (1999)].

26. La littérature différencie généralement quatre niveaux de couplage ou d'intégration des SIG et des systèmes d'optimisation linéaire : intégration d'une version simplifiée d'un des deux modèles dans l'autre (*hard linking*), lien unidirectionnel des sorties d'un des modèles vers l'autre (*soft linking*), application du principe précédent avec bouclage itératif jusqu'à la convergence vers une solution optimale pour un critère défini à partir des deux modèles (*iterative soft linking*), approche intégrée des deux modèles dans un seul modèle plus large (*integrated approach*) [Andersen (2018)].

par une projection illustrent bien la pertinence d'une approche en deux étapes comme nous nous proposons de le faire ici [27], afin de conserver les avantages de l'allocation optimale et ceux de la distribution spatiale.

Lorsqu'une représentation géographique d'une ville est trop complexe (surface trop grande, données précises manquantes…), il est en outre possible de restreindre l'étendue du territoire étudié et de ne considérer l'environnement extérieur que par les flux entrants et sortants de la zone considérée, par exemple pour l'étude du cycle du carbone d'un quartier [Kellett et al. (2013)]. L'étude de Kellett et al. (2013) met en évidence plusieurs limites sur la possible réplication du procédé à d'autres quartiers, voire à d'autres villes, ainsi que sur la précision de tels procédés et leur efficacité sur la réduction des émissions : certains choix de modélisation dépendent en fait de décisions politiques non triviales difficiles à intégrer [Kellett et al. (2013)]. Ce genre de technique peut être rapprochée de l'étude des métabolismes. On pourra se référer par exemple aux travaux de Barles (2002) et Kennedy et al. (2011) (pour ne citer qu'eux). Le découpage d'un territoire en grille, parfois employée pour l'analyse de l'évolution de l'occupation des sols, court-circuite également le besoin de données trop précises géographiquement [Fontaine et Rounsevell (2009), Holman et al. (2005) et Viguié et al. (2014a)]. C'est notamment le cas pour l'utilisation d'un automate cellulaire [Solecki et Oliveri (2004)].

Dans le but de regrouper un grand nombre de données sur des bâtiments pour réaliser une analyse spatiale, les SIG trouvent immanquablement place dans la chaîne logicielle. Fonseca et Schlueter (2015) rassemblent ainsi des données météorologiques (température ambiante, humidité relative, transmitivité solaire) sorties du logiciel Meteonorm 7.0, des données de la ville fournissant des informations locales sur les bâtiments et leurs environs (à partir d'*OpenStreetMap* et de bases de données locales), des données sur les types de bâtiments dont l'enveloppe, le système HVAC [28] et des statistiques de consommation (selon le type d'occupation, les périodes de construction et de rénovation), des données de comportement, et enfin des mesures (utiles notamment pour les bâtiments non conventionnels) [Fonseca et Schlueter (2015)]. L'utilisation de SIG est également associable à des résultats de télédétection (ou *remote sensing*), dont des photographies aériennes ou des images satellites, pour effectuer des calculs d'indicateurs (la température de surface par exemple) [Bhatta (2009) et Mavrogianni et al. (2009)]. Les résultats étant spatialement localisés, ils sont ensuite facilement comparables à d'autres paramètres urbains tels que la surface bâtie avec la croissance urbaine, la population et sa répartition par zones/la répartition du bâti, la croissance de la population/du bâti, la proportion des foyers/du bâti, etc. [Bhatta (2009)].

Quant à la visualisation de résultats, les SIG permettent éventuellement d'appuyer un outil d'aide à la décision, par exemple dans le cadre d'une politique de transport [Arampatzis et al. (2004)] ou de la limitation de la pollution de l'air [Fedra et al. (2000)]. Ils sont alors intégrés à une interface graphique ayant pour but d'être prise en main par des responsables locaux ou des professionnels des services publics des communes ou intercommunalités.

27. Notre méthodologie sera décrite dans le chapitre 3.

28. *HVAC* ou *heating, ventilation and air-conditioning* désigne les systèmes (électriques ou non) permettant la gestion du confort aéraulique dans un intérieur.

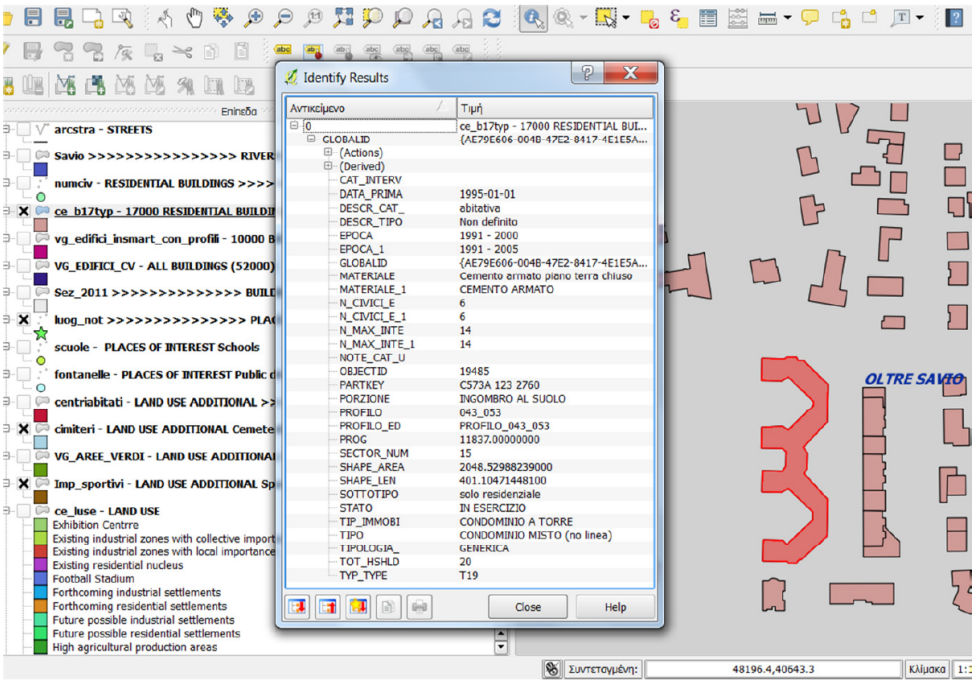


FIGURE 2.3 – Exemple d'utilisation du SIG QGIS pour la création d'archétypes de bâtiments dans le cadre du projet InSmart [KILIAS et al. (2015)].

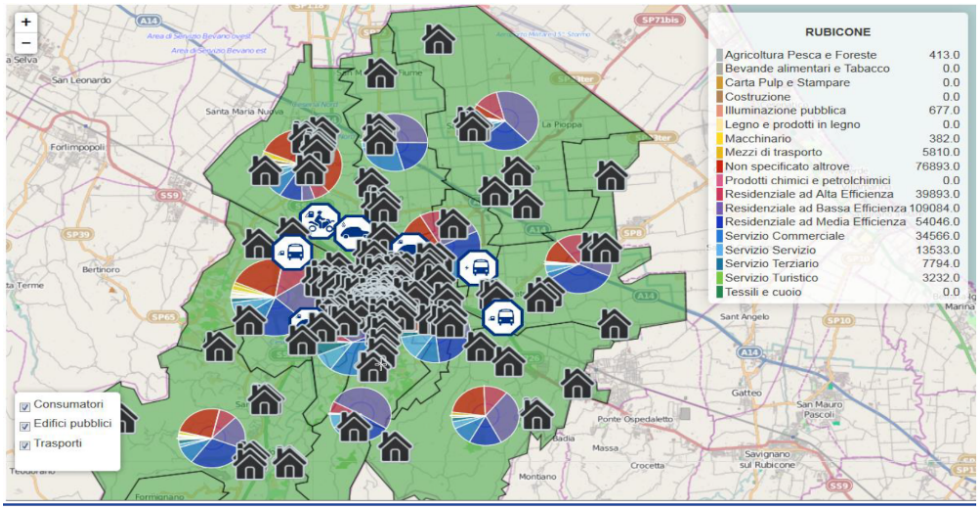


FIGURE 2.4 – Exemple d'une carte enrichie du logiciel produit par Artelys dans le cadre du projet *CitInES* [ARTELYS (2014)].

Les projets *CitInES* [29] et *InSmart* [30] donnent deux exemples de ce à quoi peuvent servir les SIG dans des projets urbains intégrant une dimension de modélisation long terme. Ces projets européens (financés par le *septième programme-cadre* de l'Union Européenne) ont tous deux consisté, pour quelques villes européennes, à rassembler un ensemble de données diverses sur les moyens de production d'énergie, la consommation des différents secteurs et la population, avant de construire des modèles permettant d'évaluer la pertinence des politiques locales d'énergie. L'accent, sur l'utilisation des SIG au sein du projet *InSmart*, est mis dans la récupération de données [31] pour le renseignement des modèles (par l'étude des réseaux, de l'éclairage public, etc.) et la création d'archétypes de bâtiments, comme montré par exemple dans la figure 2.3 [Kilias et al. (2015)]. Le projet *CitInES* a eu les mêmes besoins des SIG pour la manipulation des données d'entrée, permettant la caractérisation des systèmes étudiés. L'entreprise *Artelys*, avec le soutien de plusieurs laboratoires et associations, a en outre créé un outil (voir figure 2.4) qui intègre un SIG pour la visualisation de la situation des villes, de leurs outils de production et des effets de décisions politiques [ARTELYS (2014)]. Il convient de noter que lorsque l'on étudie les cartes visibles dans le rapport de 2014, les informations relatives aux résultats semblent être pour bonne partie agrégées à l'échelle de sous-régions de la ville : un modèle long terme est difficilement réconciliable avec une finesse spatiale.

Il est possible d'aller encore plus loin que les SIG qui se limitent généralement à deux dimensions en intégrant une troisième dimension : les travaux de Nouvel et al. (2015) proposent une intégration de deux modèles à deux échelles différentes, avec une première échelle statistique en 2D (donc de type SIG) pour la ville et un modèle 3D plus précis de type ingénieur [32] pour certaines zones choisies comme *pertinentes*. Cette vision multi-échelle n'est pas nouvelle et est même un besoin signalé depuis longtemps [Mineau (2003)].

Ainsi, nous avons vu que les révolutions de l'informatique technologique et applicative ont conduit à une explosion de la masse de données disponibles et utilisées aujourd'hui. Il existe ainsi une multitude de données, quantitatives ou qualitatives, matérielles ou immatérielles, directes ou indirectes, qui caractérisent les villes. L'intégration de ces informations dans le discours sur la ville, après des débuts cartographiques timides au XIX^{ème} siècle, est fortement lié à l'essor des SIG. Ces outils, indissociables de la manipulation de données géographiques informatiques, ont été largement mis à contribution par la communauté scientifique ainsi que par les services publics municipaux. Ils sont toutefois encore difficilement intégrés dans les savoir-faire des urbanistes d'agences privés aujourd'hui. Ils peuvent être d'une grande aide pour la constitution d'un modèle long-terme spécifique à la métropole de Bordeaux et qui nécessite de capturer l'essentiel des caractéristiques urbaines relatives à l'aménagement du territoire.

29. *Cf.* http://www.citines.com/ ou la page de Cordis [Seventh Framework Programme (2017)](consultées le 29 septembre 2020).

30. Anciennement à l'adresse http://www.insmartenergy.com (en 2017) ou sur la page de Cordis [Seventh Framework Programme (2014)] (consultée le 29 septembre 2020).

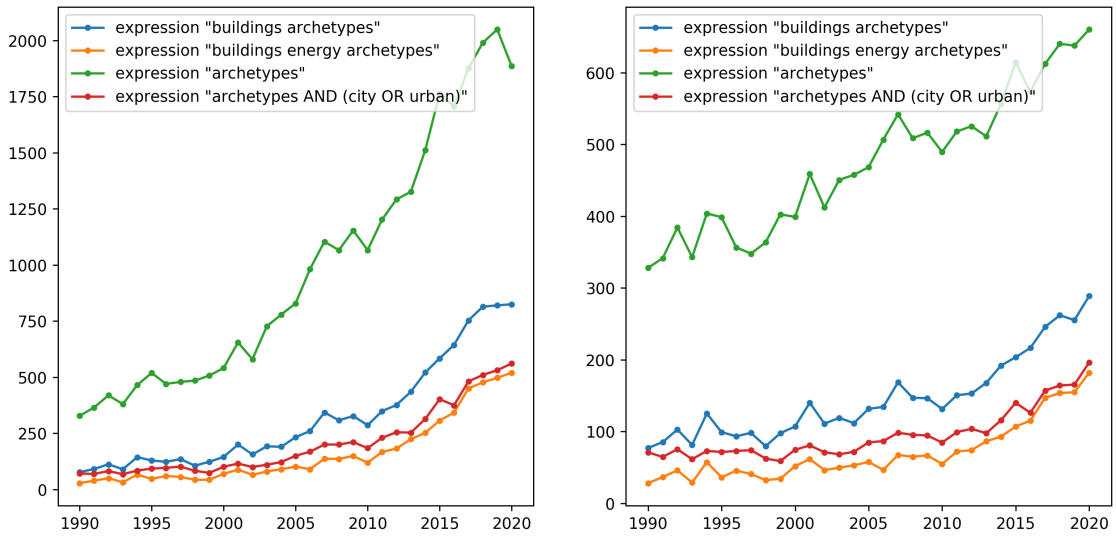
31. Il était indiqué, dans les documents initiaux, qu'il était prévu de produire des affichages des résultats sur des cartes (donc via un SIG) mais aucune information n'est, six ans après, disponible à ce sujet dans les rapports finaux des *Work Packages*.

32. Ici un modèle de simulation énergétique d'un bâtiment.

I.3. La construction d'archétypes comme description quantitative

Au vu des éléménts présentés ci-dessus, une méthodologie de modélisation de Bordeaux peut s'appuyer sur les données disponibles. Nous avons fait en sorte que notre approche soit neutre – au sens qu'elle n'est pas orientée *a priori* par un acteur public local – et qu'elle soit à la fois fidèle et utilisable dans nos outils de modélisation long terme. Pour cela, il est nécessaire de déterminer ce qui est représentatif de la ville étudiée et de la façon dont sont arrangés les quartiers, dont est utilisé le sol disponible, dont sont érigés les bâtiments et, de la sorte, obtenir une vision de l'organisation des logements et autres bâtiments. Or, les formes urbaines – c'est-à-dire les choix d'attribution et de répartition du sol entre les différents usages – et les bâtiments – c'est-à-dire les constructions établies sur les terrains pour loger habitants et entreprises – constituent les deux éléments centraux de la construction de la ville, autour de l'occupation des sols et du travail de l'aménagement [33] et peuvent être considérés séparément.

I.3.a. Les archétypes dans la littérature scientifique sur la ville



(A) Valeurs absolues

(B) Valeurs sans le biais de l'augmentation du nombre de publications sur la même période sur la plateforme `Science Direct`

FIGURE 2.5 – Évolutions du nombre de parutions par an pour la période 1990 - 2020 pour plusieurs expressions de recherche sur `Science Direct` (exécutées le 4 août 2020). Même en corrigeant par l'augmentation du nombre de publications annuelles sur `Science Direct`, on peut remarquer une augmentation du nombre d'articles se rapportant aux archétypes depuis une quinzaine d'années.

Une des méthodes fréquemment utilisée dans la littérature scientifique relative à la ville, et plus particulièrement à la consommation énergétique des bâtiments, est le recours aux archétypes. La figure 2.5 illustre la proportion de publications sur le site `Science Direct` [34] traitant des archétypes urbains ou de bâtiments

33. Voir section IV du chapitre 1, p. 49, pour plus de détails sur le fonctionnement de l'aménagement en France.

34. Voir https://www.sciencedirect.com (consulté le 4 août 2020).

parmi les publications sur les archétypes. On peut noter que les études mentionnant des archétypes et relatives aux villes sont nombreuses parmi les applications totales des archétypes.

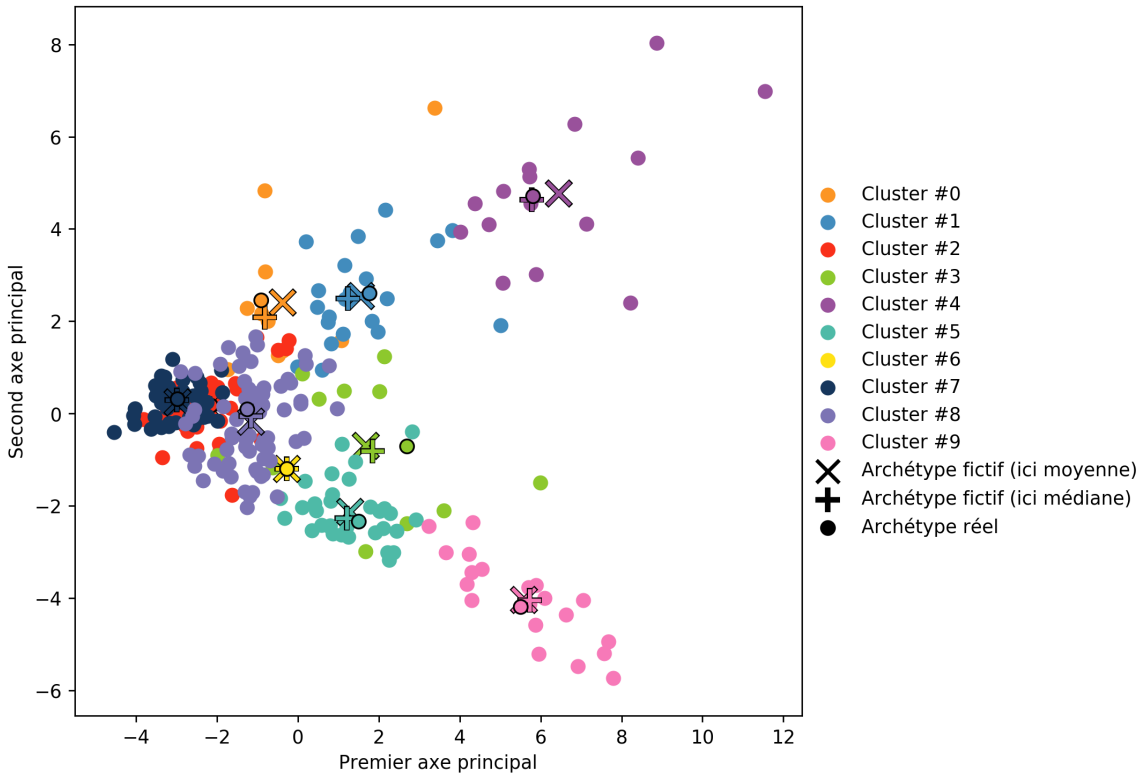


FIGURE 2.6 – Exemple de création d'archétypes à partir de nos données : on peut en fait construire trois archétypes différents pour chacun des clusters (ou groupes), l'un en prenant la moyenne des paramètres des éléments de chaque cluster, l'autre la médiane, et le troisième en prenant l'élément le plus proche du barycentre de chaque cluster. On obtient donc deux archétypes *statistiques* (les deux premiers) en ce qu'ils sont calculés à partir des paramètres des clusters, et un archétype *réel*. Il est important de noter que ces trois archétypes différents coïncident presque dans le cas du **cluster 9** par exemple tandis qu'ils sont bien distincts dans le **cluster 0**. Pour donner un exemple plus concret, la *maison non mitoyenne* qu'habitent les Dursley dans Harry Potter est un *archétype réel* de *bâtiment* représentant l'ensemble des bâtiments de type *lotissements* pour l'agglomération londonienne (groupe très variable rassemblant beaucoup de bâtiments).

Le principe d'un *archétype* est d'obtenir des éléments représentatifs d'un ensemble d'objets. Ceux-ci sont rassemblés en groupes par similarités et on choisit ou on crée ensuite un représentant pour chaque groupe. Cet archétype est alors caractérisé par une valeur pour chacun des paramètres caractérisant les objets et peut donc être réel, statistique ou virtuel selon la façon dont sont calculées ces valeurs : si les valeurs des paramètres sont celles d'un objet existant, les archétypes seront *réels* ; si les valeurs des paramètres sont calculées par moyenne ou médiane, les archétypes seront *statistiques* ; si enfin les valeurs sont inventées, ils seront *virtuels* [REINHART et CEREZO DAVILA (2016)]. La figure 2.6 expose ce fonctionnement sur les données relatives aux bâtiments des quartiers de Bordeaux. Il est tout à fait possible de généraliser cette méthode à plusieurs dimensions.

Sources d'archétypes

Face à l'absence de sources de données brutes standardisées à l'échelle européenne ou internationale, des bases d'archétypes ont été constituées ou regroupées afin de permettre des comparaisons entre pays sans la nécessité de se plonger dans les dédales des sites des institutions nationales pourvoyeuses de données. Cela a été particulièrement le cas autour des bâtiments et de leurs caractéristiques énergétiques et matérielles avec la mise en place des projets européens *TABULA* puis *EPISCOPE* [35]. Ces projets successifs ont notamment pour but, par la création d'une méthodologie de définition de ces archétypes nationaux, puis la création d'archétypes pour chaque État, de faciliter la rénovation et de rendre cette filière plus transparente à l'échelle européenne. Chaque pays a donc une déclinaison d'archétypes caractéristiques ; la France en faisant partie a par exemple la sienne selon quatre classes de bâtiments et dix périodes de construction [Rochard et al. (2015)]. L'existence de cette méthodologie et de la base permet à de nombreux projets de recherche de construire à leur tour des bâtiments de référence [Ballarini et al. (2014)] ou de développer des approches « métier » plus facilement [Exner et al. (2017) et Mutani et al. (2016)].Il existe également d'autres bases de données publiques issues de la recherche comme *elementsdb* [Kellett et Girling (2018)] ou celle du projet BUILD_ME [BUILD_ME (2020)], mais aussi privées dont *Building Types Online* de l'éditeur Birkhäuser [Birkhäuser (2018)].

Il est possible de créer des archétypes, afin d'inclure des informations plus précises par exemple, comme les caractéristiques régionales de matériaux historiquement utilisés [Tornay et al. (2017a)]. Croiser différentes approches et archétypes est ainsi parfois intéressant pour enrichir une nouvelle méthodologie [RAGE et Programme PACTE (2017)]. Par exemple, Christen et al. (2012) combinent le logiciel `EnergyPlus` et un scan *lidar* [36] d'une zone (3D des bâtiments et arbres à 1m x 1m), ce qui leur fournit des informations sur les morphologies urbaine et de bâtiment, qu'ils associent ensuite à la base *elementsdb* qui contient des données sur des bâtiments dont les auteurs tirent 12 archétypes, avec 5 volumes, 5 facteurs d'ombrage et 5 données de population différents [Christen et al. (2012)]. Il est donc parfois nécessaire d'intégrer d'autres techniques pour corriger les manquements de rigueur sur certaines disciplines [Tardioli et al. (2018)] ou la spécialisation trop forte (uniquement bâtiments résidentiels) des bases citées précédemment [Mata et al. (2014) et Tardioli et al. (2018)]. Proposer d'autres sources de données comme des images satellites permet d'élargir le panel de techniques disponibles ou ayant prouvé leur efficacité, ou facilite simplement la création des archétypes par cette méthode alternative [X. Li et al. (2018)]. D'autres choisissent enfin de générer des archétypes spécifiques afin de rendre compte du stock d'un territoire précis, l'approche statistique apportant alors des informations précises et adaptées à la zone considérée [Famuyibo et al. (2012) et Marchal (2008)]. Parmi les approches statistiques, la méthode des *k-means* [37] est utilisée à de nombreuses reprises, à la fois pour son principe pertinent et adapté que pour sa facilité de déploiement et la qualité des résultats obtenus [X. Li et al. (2018), Long et Kergomard (2005), Rousseaux et al. (2012) et Sarralde et al. (2011)].

35. Voir https://episcope.eu/welcome/ (consulté le 29 septembre 2020).
36. Le Lidar pour « *light detection and ranging* » ou « détection et estimation de la distance par la lumière » est une technique de télédétection par laser.
37. Utilisée parfois sous l'appellation *méthode des nuées dynamiques* ou des *centres mobiles*.

Applications

L'utilisation d'archétypes est identifiée par Swan et Ugursal (2009) dans leur revue bibliographique comme une technique, parmi d'autres, pour modéliser la consommation d'énergie finale dans le secteur résidentiel [Swan et Ugursal (2009)]. Il s'agit de l'usage principal de cette technique qui va se retrouver dans un grand nombre d'études plus ou moins récentes [Aksoezen et al. (2015), Christen et al. (2012), Delmastro et al. (2016), Gadsden et al. (2003) et Mata et al. (2014)]. La construction d'archétypes donne accès à un ensemble souvent plus vaste et plus complexe d'informations qui sont volontairement résumées et simplifiées au sein de chaque classe et permettent ensuite de réaliser des analyses variées quantitatives [Exner et al. (2017)]. En outre, il devient possible, en remplaçant des modèles physiques ou une description explicite (et souvent laborieuse) d'un stock de bâtiments, de conserver des niveaux de précision corrects à des échelles agrégées [Nouvel et al. (2015)] tout en allégeant largement la phase de récupération des données ou d'enquête qualitative sur le bâti d'un territoire, ou de conception et de prise en main d'un modèle physique complexe. Les archétypes ne sont pas infaillibles et, selon leur définition ou leur construction, le résultat escompté n'advient pas systématiquement : Aksoezen et al. (2015) remettent ainsi en question « le pouvoir explicatif des archétypes en tant que classification *a priori* à partir de l'âge des bâtiments et le type de logement [38] » [Aksoezen et al. (2015)]. Complexifier les archétypes augmente en général leur efficacité, en particulier en ajoutant des probabilités pour représenter la variabilité au sein d'un groupe de bâtiments représenté par un archétype [Cerezo et al. (2017)]. Les archétypes peuvent être également mis à contribution dans le cadre de l'évaluation de politiques énergétiques, de planification [Filogamo et al. (2014)] ou d'approches multi-échelles [Nouvel et al. (2015)].

Les bâtiments ne sont pas les seuls à être scrutés et classifiés dans des archétypes, les formes ou structures urbaines le sont aussi. La consommation énergétique peut être légitimement liée au climat local et la construction de archétypes de formes urbaines trouvent alors tout leur intérêt [M. Bonhomme et al. (2012)]. L'extraction d'archétype est donc en soit intéressante en ce qu'elle permet de séparer ou de rapprocher différentes zones d'un territoire, le plus souvent en vue d'études climatologiques (sur les îlots de chaleur urbains par exemple) [Long et Kergomard (2005)], en s'appuyant sur des cartes et des photos aériennes [Cionco et Ellefsen (1998)], ou pour suivre plus spécifiquement l'impact des structures sur les concentrations de polluants [Theurer (1999)]. De façon similaire à ce qui est fait dans le cas des bâtiments pour des problématiques énergétiques, ou dans notre étude ou dans les travaux de Bonhomme pour les formes urbaines [M. Bonhomme (2013)], les archétypes de formes urbaines peuvent servir d'entrée à un autre modèle, s'intéressant par exemple à l'évolution de ces formes dans une approche multi-agents [Rousseaux et al. (2012)].

Dans leur étude de la densité, Adam et Moulinié (2005a) dressent une histoire des archétypes de bâtiments de la ville de Paris et de ses environs en soulignant l'existence de plusieurs étapes ou plusieurs formes dans la construction de la ville, étapes illustrées par certains bâtiments existants aujourd'hui [Adam et Moulinié

38. « *The general explanatory power of typologies as a priori classifications by construction age and dwelling type* » [Aksoezen et al. (2015)].

(2005a, 2005b, 2005c)]. Chacune de ces formes est caractérisée par une densité de population, de foyers par hectare, un coefficient d'emprise au sol, une hauteur… autant de paramètres que l'on retrouvera dans la section suivante sur les informations caractérisant et différenciant des bâtiments les uns des autres. Le tableau 2.1 présente les archétypes identifiés par Adam et Moulinié (2005a) ainsi que les densités associées : on peut y constater une diversité importante de résultats ainsi qu'une décorrélation entre la hauteur et la densité de population [Adam et Moulinié (2005a)].

Nom	**Exemple**	**Densité résidentielle (foyers / ha)**	**Densité de pop (hab/ha)**	**Coefficient d'emprise au sol (%)**	**Nb moyen de niveaux**	**Densité bâtie**
La cité médiévale	Cœur de Paris au XIV^{ème} siècle	125	500	90	3	2,7
Centres-bourgs du début du XIX^{ème} siècle	Rueil, 1817	1,25	5	47	2,5	1,2
Ville haussmannienne du XIX^{ème} siècle	Paris, 6ème arrondissement	300	450	75	6	4,5
Banlieues pavillonnaires	Athis-Mons	3	12	15	2	0,3
Habitat social de l'entre-deux-guerres	Paris, 1925 (HBM des maréchaux)	270	450	52	8	4
Habitat social de l'entre-deux-guerres	Cité-jardin de Suresnes, 1947	60	270	45	5	2,3
Grands ensembles	La Courneuve, 1965-1970	115	350	5	15	0,75
Pavillonnaire récent en opération groupée	Quartier du Plan de l'église à Voisins-le-Bretonneux, 1979	12	-	23	2	0,5

Tableau 2.1 – Principaux archétypes de densités identifiés par Adam et Moulinié (2005a) dans leur étude de la densité dans la ville de Paris.

L'utilisation d'archétypes simplifie enfin la complexité des entrées et donc du système pour la modélisation long terme. En outre, cela permet une discussion avec des experts (urbanistes, autorités locales…) sur les objets disponibles dans le modèle (et donc pour une ville future), donnant l'occasion de proposer de nouveaux archétypes.

I.3.b. Des archétypes locaux pour comparaison ?

Répertorier quelques références d'archétypes français peut être pertinent pour la comparaison éventuelle de nos archétypes avec les résultats d'études spécifiques à la France. La source principale d'archétypes de bâtiments sur le territoire française est le rapport produit par Pouget Consultants dans le cadre des projets TABULA et EPISCOPE (*cf.* section I.3.a pour une présentation) [RAGE (2012) et Rochard et al. (2015)]. Leur façon de procéder est méthodique : séparer les bâtiments selon leur période de construction en 10 catégories, selon leur classe (c'est-à-dire maison individuelle isolée, individuelle mitoyenne, collective, immeuble) et, pour chacun des 40 archétypes créés ainsi, proposer une description et des données statistiques sur cette catégorie, et décrire plus précisément un bâtiment exemple [Rochard et al. (2015)]. Néanmoins, l'absence dans ces études d'une distribution géographique grossière des bâtiments proposés empêche une comparaison précise et locale qui aurait grandement enrichi nos résultats.

I.3.c. Application à la modélisation

Ces approches par archétypes correspondent tout à fait à notre besoin : par l'intégration d'un grand nombre de paramètres, elles permettent de prendre en compte les informations nécessaires pour une modélisation fidèle de l'urbanisme de Bordeaux ; par l'utilisation de données locales, elles donnent l'opportunité de construire un modèle qui soit spécifique au territoire de Bordeaux et lui corresponde au mieux ; enfin, elles simplifient le modèle en n'y considérant non pas chaque bâtiment ou chaque quartier mais un nombre plus limité d'objets.

Pour résumer, on sépare les caractéristiques de la ville en deux catégories, celles relatives aux formes urbaines (densité de bâti, surface d'espaces naturels, routes, etc.) et celles relatives aux bâtiments (hauteur, type de chauffage, âge, etc.), que l'on traite toutes deux en appliquant le même protocole. On dispose d'un large ensemble d'objets dans chacune de ces catégories très différents les uns des autres dont on construit les archétypes. On obtient donc, à la fin de la méthodologie, un ensemble d'archétypes de formes urbaines, représentatifs des formes urbaines de Bordeaux Métropole et associés à des valeurs de paramètres de celles-ci, et un ensemble d'archétypes de bâtiments, représentatifs des bâtiments de Bordeaux Métropole et associés à des valeurs de paramètres de ceux-ci.

I.4. Vers une approche de la ville par les données

Nous pouvons maintenant conclure cette première partie sur la ville et les données. Avant de songer à construire un modèle prospectif et de s'intéresser à l'évolution d'une ville, il est important d'en capturer les caractéristiques actuelles (ou en tout cas récentes). Cela peut se faire par des enquêtes auprès des habitants afin d'obtenir la perception que ceux-ci en ont, par une collaboration avec les collectivités locales ou les agences d'urbanistes travaillant sur le territoire considéré et ainsi profiter de leur expertise et de leurs questionnements, ce que nous avons eu la chance de pouvoir faire avec l'agence ANMA, et enfin par la récolte de données sur les caractéristiques qui nous semblent pertinentes pour notre approche. Ces approches peuvent être combinées pour s'enrichir et se compléter mutuellement : la récupération de données donne une représentation de la métropole et soulève des questions auprès des experts ; les entretiens avec les experts soulignent *a posteriori* les thématiques qui recoupent leur connaissance du terrain (plus ou moins directement [39]). Les progrès récents réalisés dans le monde de la donnée, à la fois dans la mise-à-disposition de celle-ci et dans ses manipulations, permettent d'imaginer de nouvelles méthodologies pour représenter et caractériser les éléments d'une ville ayant trait à l'urbanisme.

Nous avons choisi ici de procéder par la **construction d'archétypes représentatifs du territoire** : de la sorte, nous nous assurons d'obtenir des éléments locaux

39. Nous avons déjà mentionné le cas de la densité urbaine dont la perception par les habitants peut être différente de la mesure quantitative d'indicateurs. Comme autre exemple, la question de la porosité est très présente dans les réflexions des urbanistes sur les formes urbaines qu'ils conçoivent et n'est pas un paramètre directement récupérable auprès d'un fournisseur de données : l'importance de cette caractéristique justifie alors des calculs supplémentaires à partir de données primaires disponibles.

adaptés aux caractéristiques bordelaises [40], qui correspondent aux méthodes de la conception urbaine et de l'aménagement (parce que nous choisissons les paramètres à considérer), et nous rentrons dans le cadre méthodologique de la construction d'un modèle long terme (à nouveau grâce à la flexibilité permise par une méthodologie originale adéquate), tout en tirant pleinement parti des données disponibles sur le territoire.

À la différence de la pratique urbaniste qui base ses archétypes sur une vision sociale, politique, voire anthropologique de la ville [41], nous exploitons une analyse statistique et factuelle des données récoltées [42].

II. Méthodologie de création d'archétypes à partir d'analyse de corrélations et de clustering

Au vu du grand nombre du contexte actuel décrit ci-dessus, il est possible d'obtenir une représentation quantitative d'un milieu urbain par la construction d'archétypes. Nous proposons ici une méthodologie développée pour la métropole de Bordeaux : pour autant, nous avons cherché à ce qu'elle soit **reproductible** sur d'autres grandes villes françaises et avons ainsi utilisé des sources de données publiques ou accessibles aux entités de recherche en France (INSEE, IGN…). Les paramètres choisis sont en outre communs et peu spécifiques au territoire bordelais. Enfin, nous nous sommes concentrés sur un ensemble limité mais répandu de caractéristiques majeures plutôt que sur la collecte exhaustive et le traitement d'informations distinctives à la métropole.

La méthodologie proposée, inspirée en partie des travaux de M. Bonhomme (2013) et de Rousseaux et al. (2012), peut être décomposée en quatre étapes, visibles sur la figure 2.7 :

1. la sélection d'une zone d'étude et d'un découpage en sous-régions associé ;
2. le choix, la récupération et la mise en forme des données [43], en utilisant

40. Ce premier argument souligne à quel point nous tentons (modestement) de rester fidèles à la fois à la démarche prospectiviste et à celle urbanistique qui toutes deux ne plaquent pas de modèle tout fait sur un cas mais prennent le temps d'un diagnostic et d'une analyse spécifique pour ajuster leur méthode. Les inconvénients sont certes de limiter la possibilité de comparer avec d'autres sources puisque les études sur Bordeaux restent moins nombreuses que celles sur la ville en France ou en Europe mais ces désavantages ne contrebalancent pas la cohérence de la méthodologie ainsi produite.

41. On peut en effet voir derrière la notion d'archétype celle de modèle urbain : l'urbanisme théorique a une longue histoire de conception de modèles théoriques conçus pour révolutionner l'habitat et la vie humaine en ville [Choay (2006)]. La section V.1 du chapitre 1, p. 72, a traité d'ailleurs plus en détail la question des modèles urbains et la création d'archétypes mise au point et décrite dans ce travail de thèse ne s'inspire finalement que très peu de ce courant de pensée. Nous privilégions ici une approche statistique que nous permettent les outils scientifiques mis à contribution là où une approche urbanistique aurait demandé un bagage disciplinaire différent.

42. On pourrait questionner la neutralité du choix des paramètres. Cependant, nous avons choisi de nous appuyer sur des études existantes pour faire celui-ci et, là où les modèles urbains sont bien souvent idéologiques voire adossés à une vision anthropologique distincte qu'ils rendent peut-être plus concrète, ce n'est pas notre intention et nous cherchons au contraire à nous extraire d'une approche idéologique par cette création d'archétypes statistiques.

43. En effet, comme le constatent Alexander Wandl et al. (2014), l'utilisation d'un seul paramètre comme la densité, n'est pas suffisant pour aboutir à une classification et à une description

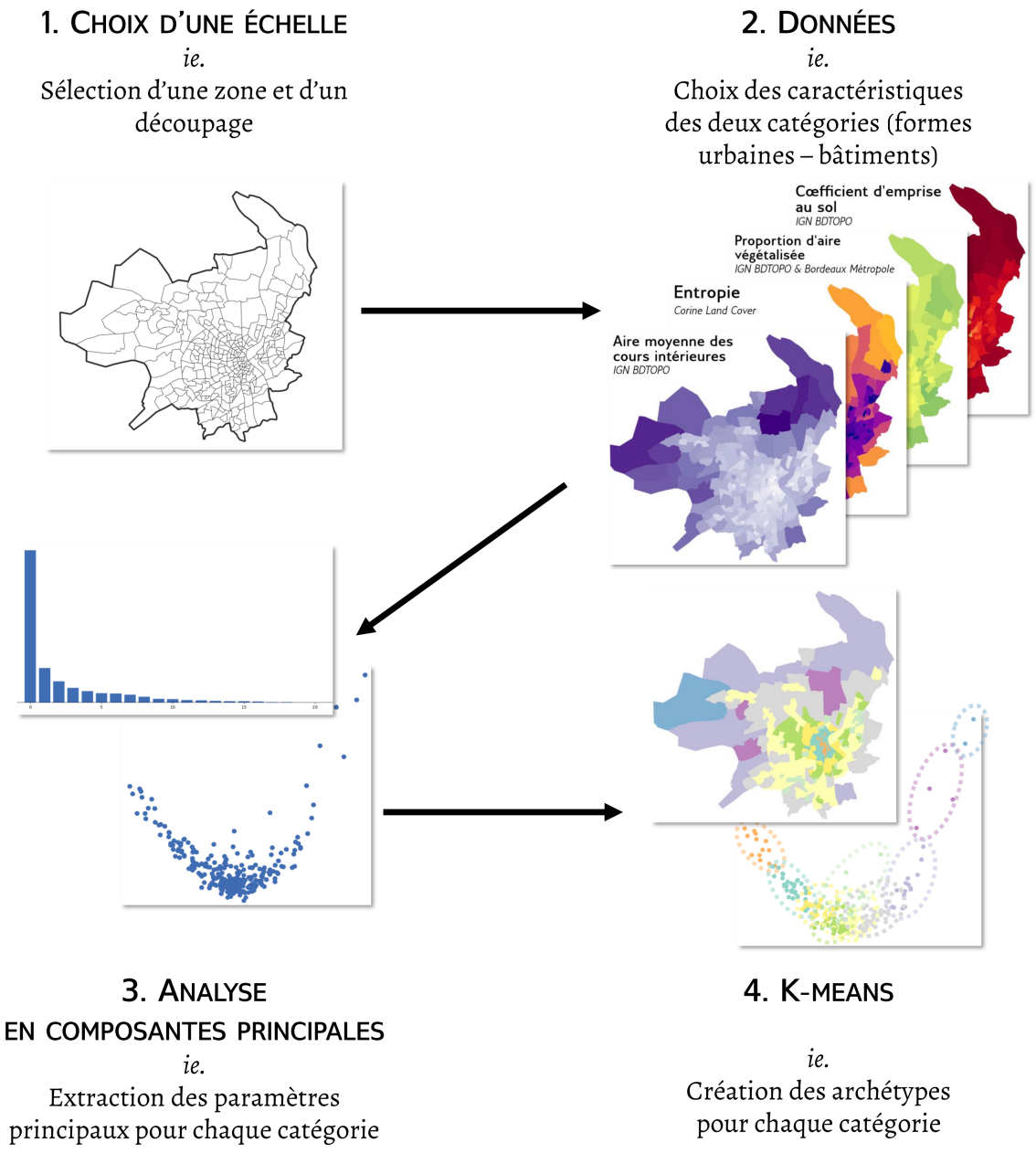


Figure 2.7 – Schéma récapitulatif de notre méthodologie.

notamment un SIG [44] ;

3. l'analyse des corrélations et l'évaluation de la pertinence de chacun des paramètres, pour une meilleure compréhension des faits marquants ressortant des données récupérées ;
4. le *clustering* et la création d'archétypes spécifiques au territoire étudié, en vue de la phase de modélisation, qui permettent l'étude qualitative des résultats et de faire le lien avec la ville plus concrète telle que vécue par les habitants et conçue par les urbanistes.

Nous allons dans cette section présenter notre choix des frontières du territoire représenté dans notre approche et la finesse du découpage appliqué (section II.1). Nous décrirons ensuite rapidement dans les sections suivantes la récupération des données (section II.2), leur manipulation et leur analyse par des méthodes d'étude des corrélations (section II.3) et enfin l'application de techniques de clustering pour la création des archétypes (section II.4). Cette méthodologie sera ensuite appliquée dans les parties suivantes pour décrire les données choisies (partie III) et les résultats obtenus (partie IV).

II.1. Du difficile choix d'une zone et d'un découpage

La notion d'échelle peut être équivoque dans le langage courant [45] : on confond ainsi parfois la définition du grain le plus fin décrit avec le choix de cadre maximal. Par exemple, la carte du métro parisien (cf. 2.8) est à l'*échelle* (au sens où elle représente l'*entièreté de*) de Paris tout entier, mais est aussi à une *échelle* (au sens où elle a une *précision* maximale de) de l'ordre de la centaine de mètres (en considérant que les proportions ne sont pas conservées). Ces deux notions d'*étendue* et de *précision* sont fortement liées en pratique et imposent quelques développements pour expliciter nos décisions. Elles ont en effet une influence directe sur les résultats que l'on peut espérer obtenir d'un exercice de modélisation [Thomas et al. (2018)].

Au sein même de la ville, on sépare généralement trois niveaux d'étude, associés à trois échelles de précision [Mineau (2003)] :

1. celle de la *planification générale*, c'est-à-dire sur l'ensemble d'une métropole, correspondant au 1/100 000^{e}.
2. celle de l'*analyse urbaine*, pour une commune ou un quartier intégré, correspondant au 1/25 000^{e}.
3. celle du *projet urbain*, correspondant au 1/2 000^{e}, voire au 1/500^{e}.

efficace. Au vu des progrès récents sur le sujet, notre méthodologie nous permet de considérer un grand nombre de paramètres quantitatifs qui enrichissent l'approche en plus de l'ancrer dans le territoire étudié.

44. Voir la section I.2.a du présent chapitre, p. 96, pour plus de détails sur l'utilisation des SIG dans l'urbanisme.

45. Cette confusion vient probablement du fait qu'en cartographie, l'échelle est un rapport de grandeur entre la distance réelle et celle reportée sur le papier. Plusieurs cartes d'une même échelle (par exemple, au 1/25 000) correspondent donc à une superficie équivalente et on peut alors confondre la *surface visible* sur la carte et l'*échelle* de la carte et utiliser abusivement le mot *échelle* pour désigner à la fois le rapport de grandeurs (1 m pour 25 000 m) et la superficie représentée (environ 400 km^{2} par exemple pour les cartes classiques au 1/25 000).

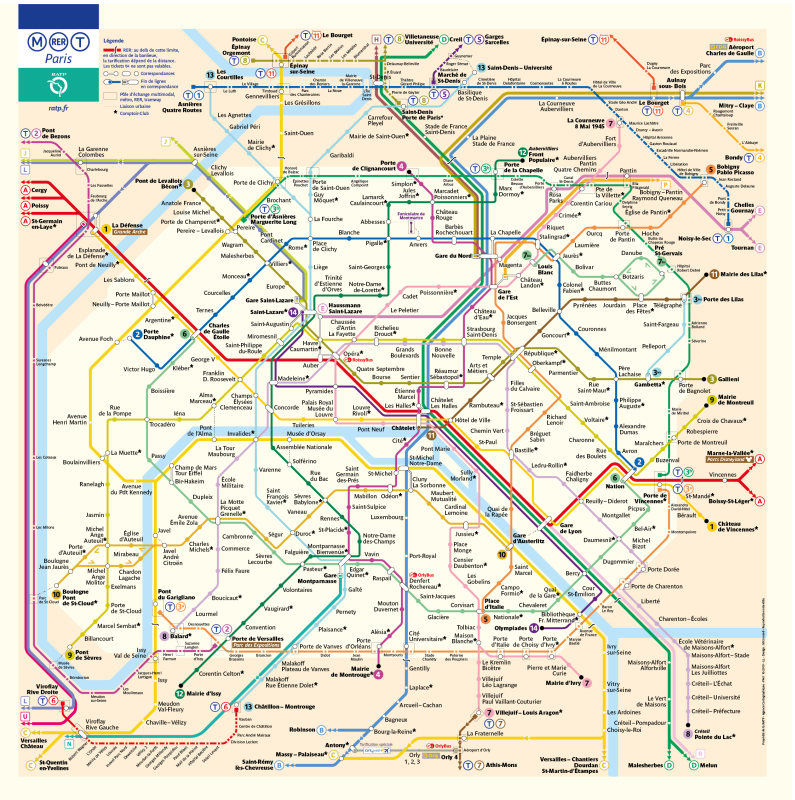


FIGURE 2.8 – Carte du métro parisien.

II.1.a. Sur l'étendue

Les villes sont des systèmes gigantesques de bâtiments, de routes, d'entreprises, d'individus et d'acteurs composés d'une multitude de sous-systèmes dont elles dépendent et qu'elles font vivre. La question de la zone d'étude est ici cruciale et il faut trouver une délimitation qui soit satisfaisante pour les besoins de notre exercice de modélisation, sur laquelle suffisamment de données soient disponibles (contrainte qui a tendance à augmenter la surface à considérer [46]), et qui ne complexifie pas démesurément la construction du modèle (contrainte qui a tendance à diminuer la surface à considérer).

Or, il est difficilement faisable de créer une étude complète et exhaustive de tous les paramètres entrant en jeu dans un milieu urbain, d'autant plus qu'il est clairement établi que l'empreinte d'une ville dépasse largement ses frontières. Pour vivre, la ville a besoin de son environnement plus ou moins proche et, lors de phases de croissance, avec une intensité et une pression grandissantes [47]. BARLES (2002) et KENNEDY et al. (2011), notamment en s'appuyant sur les travaux de WOLMAN (1965), ont par exemple regardé le fonctionnement des flux entrants et sortants du système urbain, mettant en évidence la grande dépendance à des systèmes externes fournissant (eau, énergie, nourriture, produits manufacturés, etc.) ou absorbant (déchets principalement mais aussi loisirs) ces flux [BARLES (2002), KENNEDY et al. (2011) et WOLMAN (1965)]. BARLES (2015) a ainsi publié

46. Le nombre de données disponibles pour les pays européens est bien plus vaste que pour une ville française quelconque.

47. Bordeaux Métropole le mentionne d'ailleurs dans le Plan Climat-Aire-Energie territorial : « *accueillir une population croissante, synonyme d'attractivité de Bordeaux Métropole, va mécaniquement exercer une pression environnementale accrue sur le territoire métropolitain et ses territoires voisins.* »

sur l'évolution de la ville de Paris et de son fonctionnement à travers les âges depuis le XVIII^{ème} en étudiant la question du métabolisme de Paris, à savoir son fonctionnement en tant qu'entité dépendant de son environnement. Les conclusions de l'article sont que Paris par la suite des changements effectués au cours du XIX^{ème} est aujourd'hui caractérisée par l'externalisation quasi totale de la production d'énergie, des matériaux de construction nécessaires à ses chantiers et des ressources agricoles. Les régions productrices sont bien plus séparées et éloignées (géographiquement et socialement) de la ville. L'extension de la ville par son influence sur ses terrains proches conduit à une urbanisation de surfaces de plus en plus grandes. En outre, la ville, et donc son métabolisme, dépend énormément de ses infrastructures et du développement de ses réseaux. Barles (2015) insiste donc dans ses travaux sur le besoin de ne pas limiter l'étude des flux à une étude de flux monétaires et conclut que la ville dépend d'une large couronne autour d'elle en ce qui concerne l'apport des matériaux, le traitement des déchets et l'apport des denrées agricoles, même s'il y a beaucoup de gaspillage et peu de recyclage [Barles (2015)]. Emelianoff (2007b) expose également qu'« il n'est plus possible de concevoir les villes comme des îlots pensés et gérés indépendamment de l'évolution globale de l'écoumène [48] et des interactions entre échelles spatiales et temporelles, de plus en plus nombreuses ».

Billen et al. (2012) se penchent sur cette thématique et étudient les relations entre les villes et leurs « arrières-pays » [49] [Billen et al. (2012)]. Cette notion n'a plus toujours de sens aujourd'hui (c'est-à-dire ne concerne plus tous les flux urbains) à l'heure où la globalisation relie des zones territoriales à des villes partout dans le monde et plus seulement à la ville la plus proche. Ce constat reste toutefois contrasté selon les flux considérés : contrairement à l'énergie, dont l'électricité, et d'autres commodités, l'eau reste par exemple une ressource locale, c'est-à-dire qu'elle est produite et retraitée à proximité directe de la ville [50]. La nourriture est plutôt intermédiaire puisque certaines villes et territoires parviennent à garder une activité agricole dans une surface proche de leur cœur urbain dense. Cependant, il est indubitable que les villes et leur développement ont été largement influencés par leurs relations à d'autres territoires [Magail (2019)].

Définir la ville et circonscrire la carte à considérer est donc bien difficile et dépend grandement des paramètres que l'on souhaite suivre [Stébé et Marchal (2010)]. Une ville s'inscrit dans un territoire, dans un réseau de flux (de matériaux, de produits agricoles, d'énergie, de déchets mais aussi humains, de travailleurs, de visiteurs, etc.), et dans des relations spatiales et politiques. À ces considérations géographiques et pratiques peuvent s'ajouter un contexte institutionnel et administratif d'intercommunalités ou de communautés de communes, de pôles métropolitains, d'un département et d'une région avec leurs directions respectives.

Dans notre cadre, nous avons considéré la métropole bordelaise dans ses frontières administratives. Élargir trop largement la zone d'étude peut conduire à intégrer d'autres villes et d'autres dynamiques [Thomas et al. (2018)]. À partir

48. L'écoumène « désigne l'espace de vie des hommes à la surface de la planète, l'ensemble des espaces terrestres habités par l'humanité. »[Depraz (2017)]

49. Arrière-pays au sens du territoire dans lequel est située la ville et avec lequel elle a des échanges très réguliers, via des **flux** de *population* et de *matière* en tous genres.

50. Par exemple, la célèbre station d'épuration d'Achères est tout juste située aux portes de la métropole du Grand Paris.

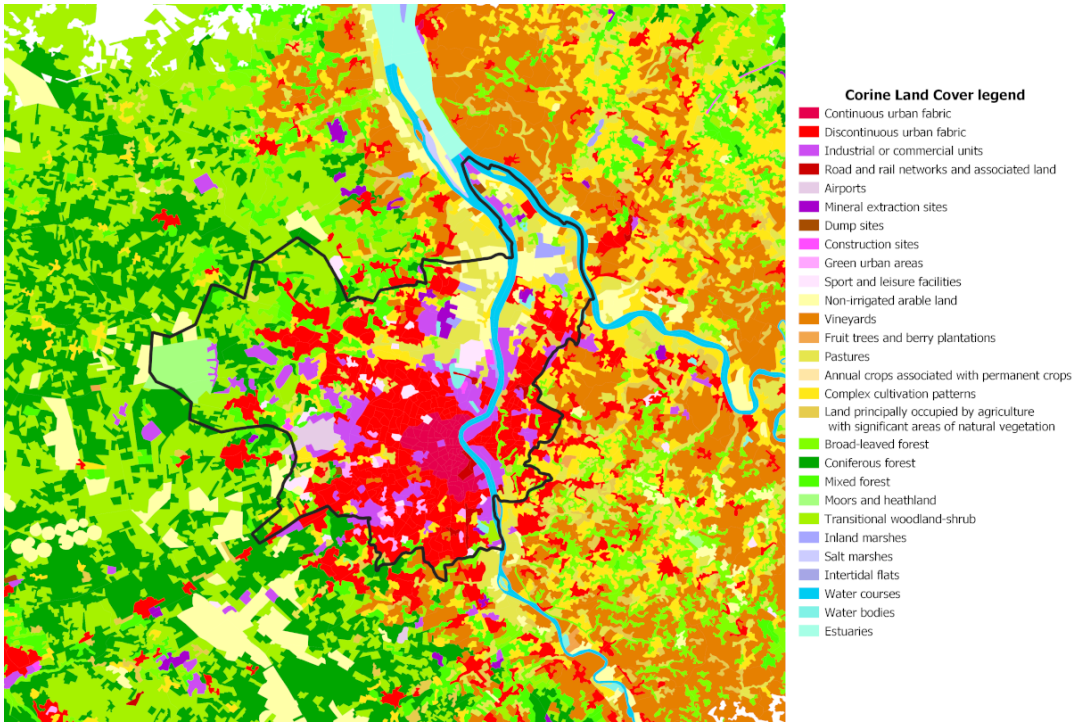


FIGURE 2.9 – Carte de l'occupation des sols autour de Bordeaux Métropole selon les données `Corine Land Cover` du projet `Copernicus` (illustration de l'auteur) [COPERNICUS (2018)]. La frontière de la métropole, utilisée comme limite de notre approche, est tracée en noir sur la carte.

du moment où nous considérons l'utilisation des sols et les bâtiments sans inclure d'analyse de cycle de vie complète ou les flux d'énergie, d'eau et de déchets, l'élargissement de territoire proné par les études citées ci-dessus n'est pas capital. De plus, la compétence d'aménagement reste dévolue à la commune et à l'intercommunalité, prendre une zone plus grande n'a donc pas de sens du point de vue urbanistique : si le modèle a pour but d'enrichir la réflexion long-terme de l'aménagement bordelais, il est suffisant dans un premier temps de se concentrer sur la métropole. Les profils des villes voisines de Bordeaux sont d'ailleurs très différents selon leur localisation, la rive est de la Garonne étant principalement occupée par d'importantes terres agricoles dont les fameuses viticultures bordelaises tandis que l'ouest de la Garonne est plutôt recouvert de forêts (*cf.* figure 2.9).

II.1.b. Sur la précision

La précision des données est *a priori* quasi parfaite à l'échelle de la métropole, c'est-à-dire que bon nombre d'informations sont localisées à une précision inférieure au mètre ou à la dizaine de mètres, marge d'erreur négligeable pour une telle étendue. C'est le cas de la BDTOPO de l'IGN par exemple, qui rassemble bâtiments, routes, espaces naturels et autres objets spatiaux sur l'ensemble du territoire français ; Corine Land Cover, du projet Copernicus, a également une précision inférieure à 25 m [51] ; Urban Atlas, issu du même projet, a une précision

51. *Cf.* https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover (consultée le 3 décembre 2020).

de l'ordre de 2 à 2,5 m [52]. Les autres données sont disponibles selon des découpages administratifs communaux ou infra-communaux. Pour rassembler les données disponibles selon plusieurs découpages et résolutions différentes, il est donc nécessaire de s'appuyer soit sur une grille régulière, soit sur un découpage non régulier, et de les y agréger ou de les y désagréger.

Une grille régulière ne correspondrait en fait pas à un découpage ayant un sens ni en terme de quartier ni en terme de projet urbain. De plus, elle donnerait plus facilement l'impression de proposer une solution générique applicable partout et non spécifique à un territoire, « *collable* » à n'importe quel endroit de façon optimale, ce qui contredirait les principes des approches urbanistique et prospective que nous cherchons à mettre en œuvre ici. L'application d'un découpage régulier peut enfin conduire dans certains cas à obtenir beaucoup de cellules vides, ce qui créerait un biais. Une trop grande désagrégation spatiale conduit également parfois à des incertitudes trop grandes pour les modèles long terme [Acheampong et Silva (2015)]. Nous avons donc préféré nous appuyer sur le découpage des Ilots Regroupés pour l'Information Statistique, bien plus pertinent dans notre contexte de modélisation, tout en gardant à l'esprit qu'un découpage montre toujours des limites qui peuvent parfois impacter la qualité des résultats obtenus [Hamilton et al. (2017)].

L'IRIS, échelon nécessaire d'organisation spatiale de données

Les IRIS, acronyme pour « Ilots Regroupés pour l'Information Statistique », ont été définis en 1999 par l'INSEE [53] « afin de préparer la diffusion du recensement de la population ». Le but était de découper l'ensemble du territoire français en « mailles de taille homogène » permettant d'effectuer un recensement statistique. La taille en question était celle d'environ 2000 habitants à l'époque, en considérant que les communes de moins de 5000 habitants (et certaines entre 5 000 et 10 000 habitants pour des raisons de répartition) n'ont pas été subdivisées [Durr (2005) et INSEE (2016)]. Les villes ont depuis évolué et augmenté ou diminué en population conduisant à des IRIS de populations bien plus variées. Le découpage géographique est quant à lui bien évidemment resté stable – sauf quelques retouches mineures en 2008 qui n'affecteront pas notre étude.

Derrière la création de cette division administrative se trouvent les besoins d'anonymat et de respect de la vie privée ainsi que de simplification et de diminution du coût du recensement [Durr (2005)]. En effet, l'utilisation de techniques statistiques permet d'éviter de procéder à un recensement exhaustif et onéreux, qui commençait à peser sur l'État et les communes, et de n'agir que par des enquêtes plus ponctuelles. En outre, avoir des données agrégées à un ensemble de 2000 habitants environ cache un individu dans le nombre et évite d'exposer des données personnelles (dont les revenus et les caractéristiques socio-professionnelles). L'échelle des IRIS semble avoir fait ses preuves sur cet enjeu d'anonymisation des données [Acs et Castelluccia (2014)]. Avec l'évolution au cours des années récentes en particulier autour de l'ouverture de nombreuses données concernant la population, l'IRIS a également vu son rôle évoluer et « constitue [maintenant]

52. *Cf.* https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2012?tab=metadata (consultée le 3 décembre 2020).

53. L'ensemble des citations suivantes du paragraphe est issu de la page définissant l'IRIS sur le site officiel de l'INSEE [INSEE (2016)].

la brique de base en matière de diffusion de données infra-communales », c'est-à-dire que les données diffusées par un organisme public à une échelle inférieure à celle de la commune le sont systématiquement à l'échelle de l'IRIS. C'est le cas, par exemple, pour les données publiques du recensement comme les caractéristiques de la population ou celles de consommation d'énergie. Autrement dit, c'est l'échelle géographique la plus fine à laquelle les fournisseurs de données (les collectivités mais aussi les entreprises, dont les énergéticiens) rendent leurs cartes ou résultats disponibles.

Mise en relation avec notre contexte

Il est donc légitime, au vu de ce qui vient d'être présenté, que notre choix de découpage spatial soit celui des IRIS. Cette échelle est pertinente pour plusieurs raisons par rapport à un découpage régulier en grille de cellules d'une certaine surface comme cela a pu être fait dans d'autres études [Aboelata et Sodoudi (2019), Long et Kergomard (2005), Siala (2019) et Viguié (2012a)] : la grande majorité des données non spatiales sont agrégées à cette échelle en France, évitant d'avoir à procéder à des désagrégations difficiles ; l'IRIS a des dimensions proches de celle d'un quartier et d'une entité urbaine sensible et appréhendable contrairement à une grille régulière ; enfin, cette taille de 2000 habitants est relativement similaire à celle des projets d'urbanisme (les bassins à flot précédemment cités représentent un peu plus de 5000 logements, c'est-à-dire environ 8000 personnes).

L'intérêt de la modélisation à l'échelle du quartier permet également de se pencher sur de nombreuses formes de transformation urbaine : « *rénovation de quartiers, changement d'utilisation des bâtiments, déploiement de réseaux de chaleur ou de production décentralisée, etc.* [54] » [Caputo et al. (2013)] et est privilégiée lors de certaines approches, métaboliques [55] par exemple [Kellett et al. (2013)].

Pour tout obtenir à l'échelle des IRIS, des opérations de moyenne et d'agrégation diverses ont par conséquent été effectuées sur les données obtenues à des échelles trop fines (sub-IRIS).

II.1.c. Application à Bordeaux Métropole

Pour résumer, nous avons englobé dans notre approche le territoire administratif de la métropole de Bordeaux que nous avons ensuite découpé selon les IRIS ce qui donne la carte 2.10. Ce territoire comporte 28 communes [56] regroupant 277 IRIS. Les données sont alors agrégées ou désagrégées à cette échelle.

54. « District refurbishments ; changes of buildings' uses ; implementation of district heating and distributed generation systems, etc. » [Caputo et al. (2013)]

55. Les approches métaboliques sont celles qui considèrent un système à partir des flux dont il est la source et le destinataire. Nous avons déjà mentionné les récents travaux de Barles (2002) et de Kennedy et al. (2011) ainsi que leurs inspirations de Wolman (1965) dans la section II.1.a de la présente partie, p. 113.

56. Les caractéristiques des communes ont déjà été présentées à la section I.3 sur Bordeaux au chapitre 1, p. 11.

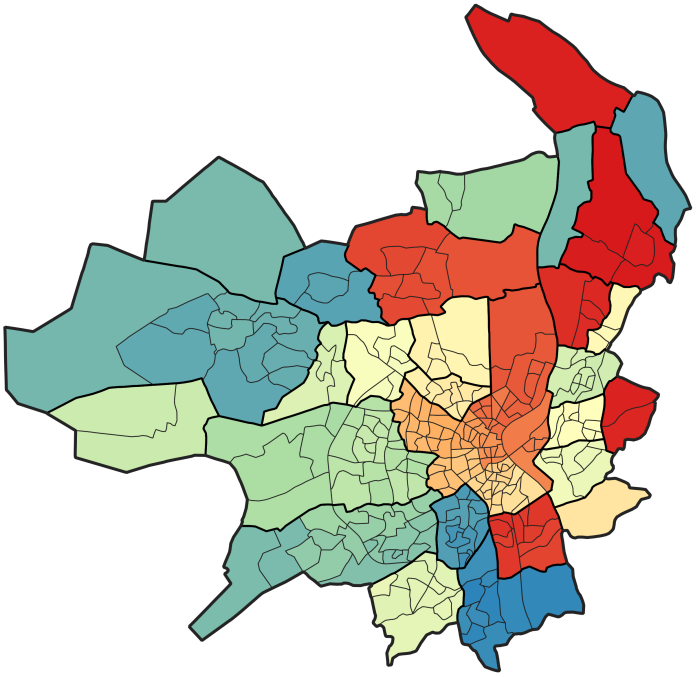


FIGURE 2.10 – Carte des IRIS de la métropole bordelaise.

II.2. De la dépendance aux bases de données disponibles

Le choix des paramètres considérés dans notre construction d'archétypes est détaillé dans la section suivante (voir partie III, p. 124). Elles sont principalement issues des sources publiques suivantes :

- l'INSEE ou *Institut national de la statistique et des études économiques*, en particulier dans ses bases `Logements`, d'`Évolution de la structure de la population`, d'`Équipements` et d'`Emplois` ;
- l'IGN ou *Institut national de l'information géographique et forestière*, en particulier dans ses bases de données (BD) `Topographique` (BDTOPO), `Parcellaire`, `Route500` et `Contours` ;
- la ville et la métropole de Bordeaux dans leurs sites d'*OpenData* respectifs [57] ;
- l'initiative *Copernicus* et ses deux projets `Corine Land Cover` et `Urban Atlas` [58].

Elles ont été manipulées à l'aide de différents outils, qui sont nécessaires dans ce genre de travaux [ALLEGRINI et al. (2015) et ASCIONE et al. (2013)] car ils permettent l'automatisation de certaines actions et traitements :

- le langage `Python` [59] et notamment les librairies `pandas` [60], `geopandas` [61], `matplotlib` [62], `numpy` [63], `rasterio` [64] ;

57. Voir https://opendata.bordeaux-metropole.fr/, les deux sites ayant été fusionnés début 2020.
58. Voir https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas et https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover (consultées le 29 septembre 2020).
59. *Cf.* https://www.python.org/ (consultée le 20 octobre 2020).
60. *Cf.* https://pandas.pydata.org/ (consultée le 20 octobre 2020).
61. *Cf.* https://geopandas.org/ (consultée le 20 octobre 2020).
62. *Cf.* https://matplotlib.org/ (consultée le 20 octobre 2020).
63. *Cf.* http://numpy.org/ (consultée le 20 octobre 2020).
64. *Cf.* https://rasterio.readthedocs.io/ (consultée le 20 octobre 2020).

- le logiciel `QGIS` [65] ;
- la base de données `PostgreSQL` [66] et son extension `PostGIS` [67].

Les données sont préalablement normalisées (centrées et réduites) : c'est une pratique quasi systématique lors de l'emploi de techniques de clustering (ou plus généralement de machine-learning), afin d'uniformiser l'espace des valeurs possibles [Jaitley (2019) et Z. Zhang (2019)]. En effet, dans les paramètres utilisés ici, certains peuvent être en m^2 (variant donc entre 0 et 500 000 000 par exemple), en pourcentage (entre 0 et 1), en nombre (e.g. pour la population), etc. Le nuage est donc fortement déformé selon les axes avec des valeurs élevées tandis que les variations sur des axes de petites valeurs sont négligées dans l'étude statistique de l'ensemble. La normalisation permet de mettre sensiblement toutes les données sur une échelle similaire et rétablit l'équilibre entre les différents axes. La normalisation, en travaillant sur la moyenne et la variance, ne retire toutefois pas les valeurs aberrantes (appelées *outliers*) qui resteront saugrenues dans le nouveau référentiel et qu'il conviendra d'exclure ou de corriger par une autre valeur.

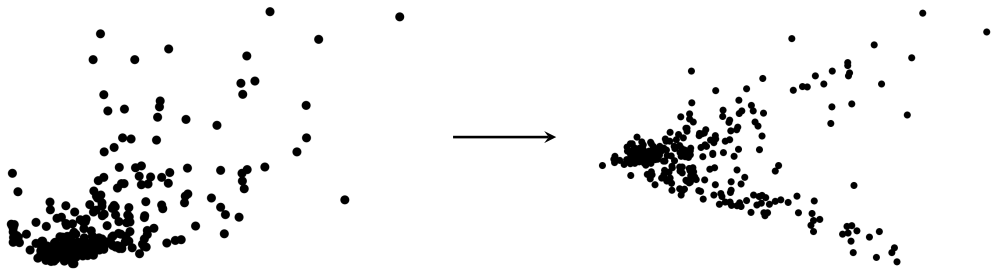
II.3. De l'utilisation d'une Analyse en Composantes Principales pour l'étude des corrélations

L'*Analyse en Composantes Principales*, ci-après désignée par le sigle *ACP*, est un outil fréquemment mis à contribution en analyse de données : la matrice de covariance des données normalisées est calculée puis diagonalisée, ses vecteurs propres formant alors de nouveaux axes décorrélés et ses valeurs propres correspondant au poids de chacun de ces axes ; les données initiales peuvent être enfin reprojetées dans l'espace des vecteurs propres [Gonzalez (2011)] (voir figure 2.11). Elle permet alors un changement de base avec les nouveaux axes porteurs d'une grande variance et est notamment employée pour visualiser un nuage de points de trop grande dimension (avec $n > 3$) en reprojetant le nuage de points sur deux ou trois axes principaux [Wikipédia (2020a)]. Il est donc possible en utilisant une ACP de simplifier la représentation visuelle de l'ensemble des IRIS de Bordeaux en retirant les paramètres superflus. Les contributions des IRIS et des axes originaux à la formation des nouveaux axes peuvent également être calculées pour comprendre la nouvelle projection et déterminer la signification de chaque nouvel axe.

Des études de corrélation permettent en outre d'évaluer les paramètres les plus significatifs statistiquement et différenciant les IRIS les uns des autres. Autrement dit, de telles techniques mettent en évidence les corrélations entre les différentes caractéristiques, révélant parfois d'intéressants liens entre des paramètres, ainsi que des IRIS au statut particulier.

Ces simples exercices de statistiques nous sont nécessaires avant l'application de tout autre algorithme plus évolué (de clustering par exemple) pour s'assurer d'avoir les données d'entrée les plus *propres* possibles [68] mais surtout pour mieux

65. *Cf.* https://www.qgis.org/ (consultée le 20 octobre 2020).
66. *Cf.* https://www.postgresql.org/ (consultée le 20 octobre 2020).
67. *Cf.* https://postgis.net/ (consultée le 20 octobre 2020).
68. Par propreté de données, on entend l'absence de valeurs manquantes, de valeurs aberrantes

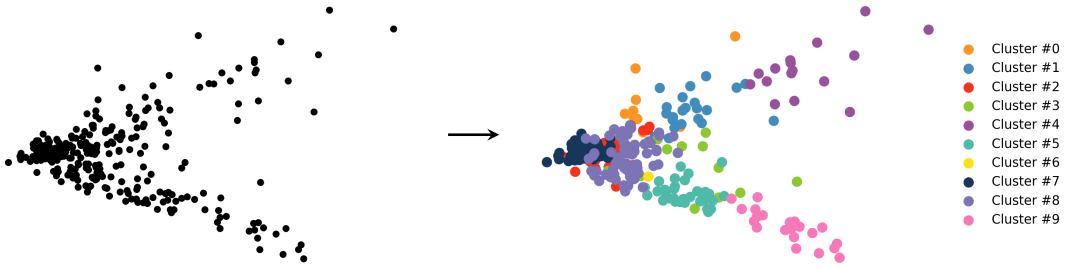


(A) Situation initiale (B) Reprojection de l'ACP

FIGURE 2.11 – Démonstration de l'effet de l'ACP sur l'ensemble des IRIS de la métropole de Bordeaux. Les paramètres utilisés comme coordonnées du nuage de points sont ceux caractérisant les bâtiments. Ils seront présentés plus en détail dans la section III, p. 124, du présent chapitre, et servent principalement d'illustration de la méthodologie décrite ici.

comprendre la situation initiale et extraire des informations sur la métropole de l'ensemble de données rassemblées.

II.4. De l'application du clustering



(A) Données après reprojection de l'ACP (B) Résultats du clustering

FIGURE 2.12 – Effet du clustering sur l'ensemble des IRIS de la métropole de Bordeaux.

De ces données reprojetées [69], nous pouvons construire nos archétypes pour les deux catégories de paramètres, ceux caractérisant les *formes urbaines* et ceux relatifs aux *bâtiments*. Pour cela, nous allons tout d'abord regrouper les IRIS similaires d'après leurs paramètres pour chacune des deux catégories (voir figure 2.12).

Étant donné le faible nombre d'éléments (il n'y a que 277 IRIS dans la métropole de Bordeaux) et le nombre de paramètres (entre 20 et 40 selon la catégorie), deux algorithmes de clustering nous ont paru pertinents [70] : celui des **k-means** (ou *k-*

liées à des erreurs de mesure ou techniques, de valeurs spéciales - ou *outliers*, de colonnes corrélées les unes avec les autres. Il y avait très peu de valeurs manquantes dans les données récoltées et nous les avons comblées selon différentes techniques (dont la technique du Lasso et une moyenne par proximité spatiale), comme nous allons le voir dans la partie suivante sur les données (voir section III, p. 124). Quelques IRIS étaient très spécifiques et un IRIS a été retiré pour chaque catégorie.

69. Il n'est pas systématiquement nécessaire ou pertinent d'appliquer une ACP avant d'utiliser les algorithmes de clustering sur les données reprojetées [YEUNG et RUZZO (2000)]. Néanmoins dans notre cas, l'ACP permet une vaste analyse des données d'entrée et donne une première idée de l'importance des paramètres qui demeure primordiale pour notre étude.

70. La page https://scikit-learn.org/stable/tutorial/machine_learning_map/index.html de la documentation de `scikit-learn` fournit un arbre de décision pour le choix d'algorithmes de clustering.

moyennes) et celui du **hierarchical clustering** (ou encore *clustering hiérarchique*). Ces deux techniques sont régulièrement mises à contribution dans la détermination de motifs caractéristiques ou d'éléments représentatifs [71].

Le fonctionnement de l'algorithme du k-means

Le fonctionnement du *k-means* est relativement simple. Son but est de séparer les données fournies en *N* groupes en minimisant un critère choisi caractérisant les groupes créés. Ce critère peut être de plusieurs formes mais la somme des carrés des écarts à la moyenne des clusters (aussi appelée *inertie*) est souvent utilisée [Pedregosa et al. (2011)]. Pour minimiser ce critère, le *k-means* est initialisé avec des centres (tirés aléatoirement ou choisis) placés dans le nuage de points. Les points sont associés au centre le plus proche, formant une première partition de l'ensemble, puis les barycentres de chacune des parties sont calculés, formant de nouveaux centres et permettant la répétition de ces deux étapes jusqu'à remplir un critère de convergence de la fonction objectif – ou inertie – des clusters. En notant C l'ensemble des clusters, m_j la moyenne du cluster $j \in C$ et x_i les données, l'inertie peut être calculée par la formule suivante :

$$\sum_i min_{m_j \in C}(\|x_i - m_j\|^2)$$

Cette méthode de clustering a plusieurs inconvénients [72] non rédhibitoires dans l'application qui en est faite ici. Il arrive ainsi de tomber dans des minima locaux (et il est donc intégré dans la fonction de la librairie `scikit` de faire tourner plusieurs fois l'algorithme avec des initialisations aléatoires) et cette technique crée des clusters qui sont relativement ronds (au sens isotropiques) et convexes pour les métriques simples, ce qui peut ne pas correspondre à certaines situations spécifiques où le nuage de points est étiré selon un ou plusieurs axes.

Le fonctionnement du clustering hiérarchique

Le principe du *hierarchical clustering* est de rassembler un par un les objets pour en faire des groupes (ou inversement de séparer petit à petit l'ensemble pour en faire des sous-groupes). Une bonne visualisation qui permet de comprendre aisément le fonctionnement des deux formes de clustering hiérarchique est celle du *dendrogramme* tel que présenté sur la figure 2.13. À gauche, sur l'axe des ordonnées, on trouve l'ensemble des IRIS de la métropole. Ceux-ci sont successivement rassemblés en groupes au fur et à mesure que l'on progresse sur l'axe des abscisses vers la droite, ces groupes étant eux-mêmes fusionnés jusqu'à

71. Par exemple, Rousseaux et al. (2012) construisent de la même façon que nous cinq *structures urbaines* à partir des résultats d'un *k-means* sur neuf paramètres appliqués sur une grille régulière. Liao (2018) analyse des données géoréférencées de Twitter pour construire quatre profils de déplacement des piétons en ville en utilisant le *clustering hiérarchique* sur les distances parcourues et la fréquence de visite de certains lieux des déplacements des individus. Fonseca et Schlueter (2015) utilisent pour leur part l'algorithme du *k-means* pour rassembler des bâtiments entre eux en fonction de leurs caractéristiques énergétiques. Sachs et al. (2019) définissent des *bandes de densité d'énergie* pour la consommation des pays en appliquant le *k-means* sur les consommations finales.

72. La documentation de la librairie scikit learn est claire sur la description du fonctionnement des algorithmes de clustering et des inconvénients de la méthode des *k-means*. Voir https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html et https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html (consultés le 29 septembre 2020).

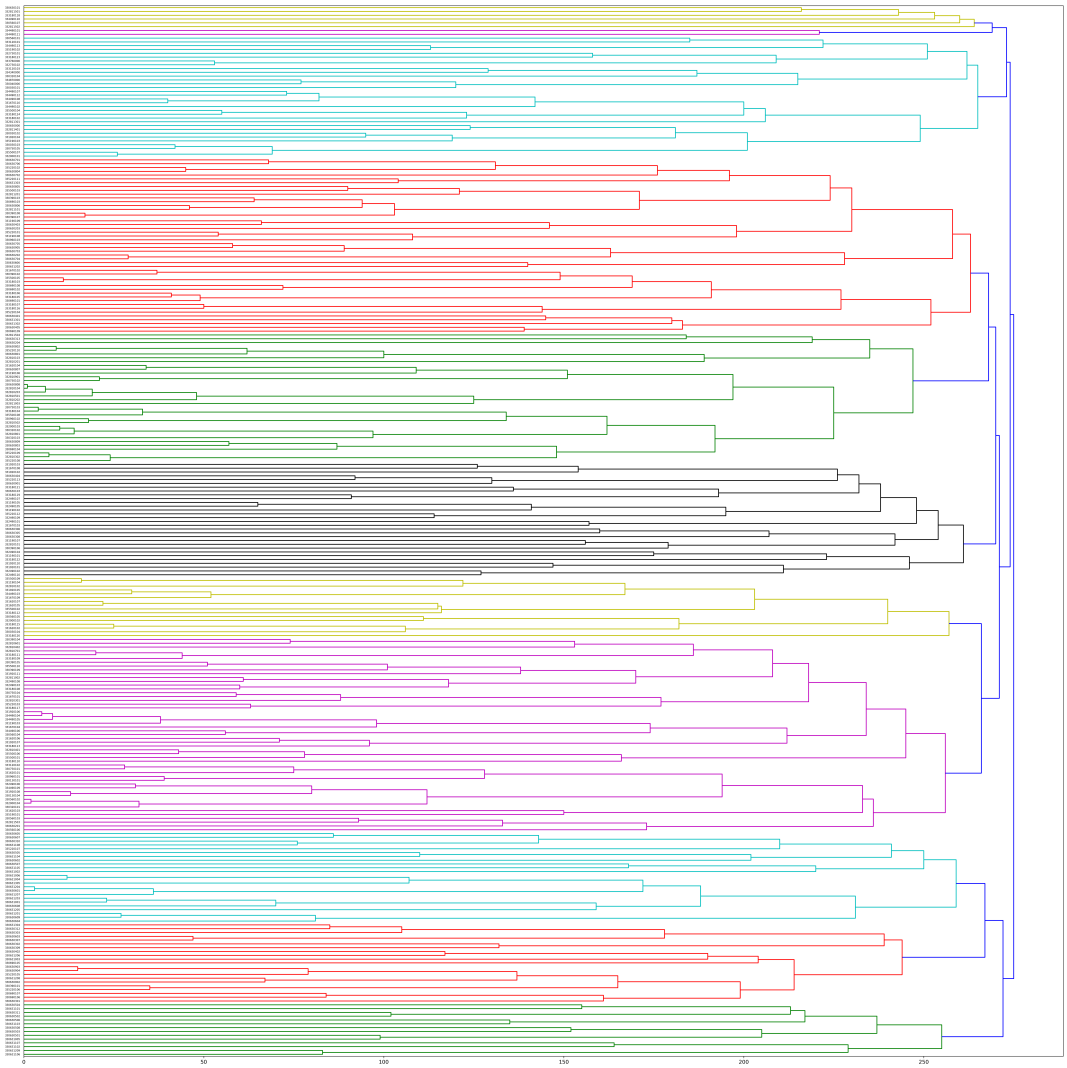


FIGURE 2.13 – Exemple de dendrogramme de l'*agglomerative clustering* sur les IRIS de la métropole de Bordeaux.

obtenir un seul groupe à droite (ou inversement, on peut lire l'axe des abscisses de la droite vers la gauche et c'est alors la métropole qui est séparée en groupe de tailles de plus en plus réduites). Il y a donc $n - 1$ fusions, visibles sur l'axe des abscisses où n est le nombre d'objets.

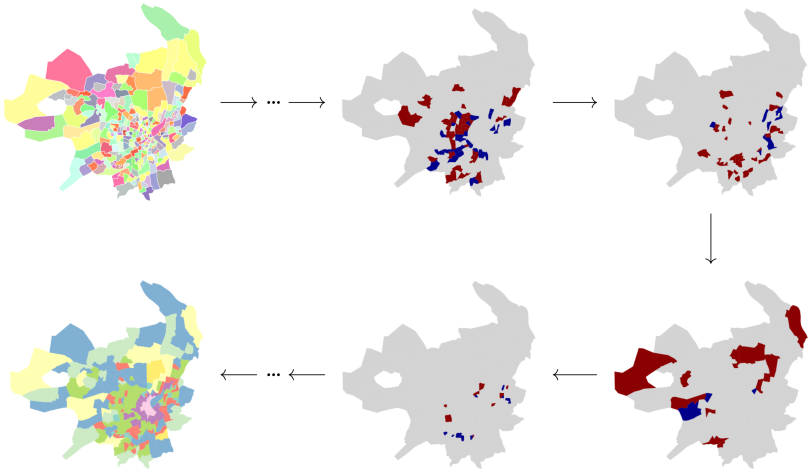


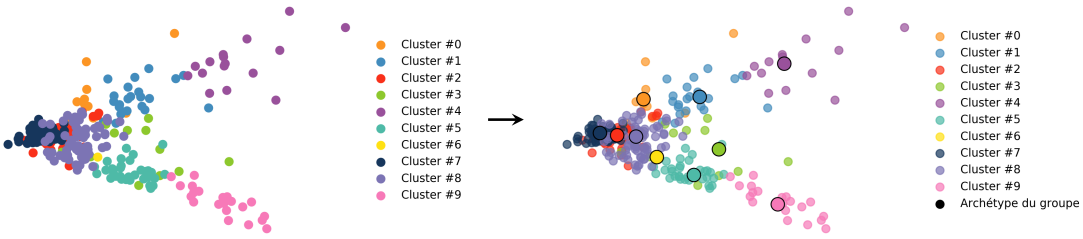
FIGURE 2.14 – Exemple de quelques étapes successives de fusion ou d'agglomération de clusters. À l'état initial, les IRIS sont chacun isolés dans un cluster, formant donc 277 clusters (haut gauche). Chaque étape effectue la fusion de deux clusters : ainsi, chacune des quatre cartes de droite effectue la fusion du cluster **rouge** et du cluster **bleu**, ce qui crée un nouveau cluster et supprime les deux anciens clusters. On passe ainsi de n clusters avant une étape à $n - 1$ après l'étape. La carte résultante (bas gauche) présente une situation où l'on a figé le nombre de clusters à 10.

L'intérêt majeur de cette technique est de mieux comprendre ce qui fait la similarité des éléments rapprochés au sein d'un même groupe lors de l'approche *bottom-up* ou d'*agglomerative clustering* qui consiste à procéder à des fusions successives (donc en lisant la figure 2.13 de gauche à droite). La figure 2.14 expose quelques étapes d'« agglomération » sur les IRIS de la métropole. On peut voir géographiquement quels sont les groupes rassemblés pour mieux évaluer la raison de ces fusions (zones périurbaines, plutôt rurales, zones d'activité économique, etc.). Lors d'une approche *top-down*, à savoir de division des groupes, c'est plutôt l'occasion de déterminer ce qui différencie les clusters les uns des autres.

Il existe plusieurs métriques possibles pour faire les choix d'agglomération. La plus commune, celle que nous utiliserons ici, est la métrique `ward` très proche en essence de la fonction objectif de la méthode des k-means en ce qu'elle cherche à minimiser la somme des carrés des différences des éléments les uns avec les autres au sein d'un groupe, correspondant à une minimisation de la variance [WARD (1963)].

La construction des archétypes

Une fois les clusters obtenus, il ne reste plus qu'à prendre un membre de chacun d'eux pour définir nos archétypes (voir figure 2.15). La médiane ou la moyenne sont toutes deux pertinentes pour la construction d'archétypes statistiques : la médiane fournirait des valeurs *réelles* pour chaque paramètre mais l'ensemble des médianes ne correspondant pas nécessairement à un quartier réel, cela n'améliorerait pas la pertinence des archétypes. Ceux-ci sont donc construits avec la moyenne des paramètres des groupes déterminés par le clustering.



(A) Résultats du clustering

(B) Définition d'archétypes réels par candidat plus proche du barycentre

FIGURE 2.15 – Définition des archétypes à partir des clusters obtenus par l'application du *k-means* ou du *clustering hiérarchique*, exemple sur l'ensemble des IRIS de la métropole de Bordeaux.

II.5. Synthèse

Pour définir notre méthodologie, nous avons d'abord dû choisir l'échelle à laquelle nous fixer, en remarquant que ce choix n'est jamais anodin et que l'importance d'un terrain d'application spécifique est commune à l'urbanisme et à la modélisation prospective, confirmant les conclusions du premier chapitre [73]. Après avoir constaté que la ville est largement dépendante des territoires plus ou moins proches de ses frontières physiques pour ses besoins quotidiens, nous avons préféré nous arrêter aux limites administratives de la métropole de Bordeaux afin de profiter de la politique d'ouverture des données de celle-ci, mais aussi suite aux constats que notre approche ne prend pas en compte les flux et s'intéresse à des problématiques urbanistiques limitées par le cadre institutionnel métropolitain. Les données quantitatives sont quant à elles récupérées à l'échelle des IRIS, entités géographiques créées par l'INSEE en 1999 pour des raisons de statistique et de respect de la vie privée. Une fois les données rassemblées, nous effectuons des analyses de corrélation (dont une *analyse en composantes principales*). Nous créons enfin des archétypes pour les *formes urbaines* et les *bâtiments* séparément, par l'application de deux algorithmes de clustering classiques (*k-means* et *hierarchical clustering*) qui rassemblent les IRIS similaires au regard de la métrique utilisée en dix clusters par catégorie dont sont ensuite extraits les archétypes comme barycentres des clusters.

Les sections suivantes présenteront le choix des paramètres (section III), que nous avons volontairement mis de côté pour l'instant pour ne pas surcharger cette partie méthodologique, et les résultats d'archétypes de formes urbaines et de bâtiments obtenus sur Bordeaux (section IV).

III. Choix, récupération et traitements des données pour le clustering

Nous commençons donc l'application de notre méthodologie par la sélection de paramètres parmi les très nombreux indicateurs possibles. La sélection parmi le

73. On pourra voir par exemple les remarques sur la modélisation faites dans la partie V du chapitre 1, p. 71.

grand nombre de caractéristiques utiles se fait en s'appuyant sur les recommandations d'autres études et sur l'avis d'experts qualifiés. Nous gardons également à l'esprit notre critère de reproductibilité de la méthode et donc de la disponibilité, de l'accessibilité, de la fiabilité et de l'âge des données. Il serait en outre contreproductif de prendre trop de temps pour créer de nouvelles données dans un projet de recherche limité comme l'est celui d'un travail de thèse dont ce n'est pas le sujet.

La thèse de M. Bonhomme (2013), sur laquelle nous avons fondé un grand nombre de nos propositions, présente ainsi un large panel de paramètres urbains. M. Bonhomme (2013) les répartit en cinq catégories selon l'échelle d'étude [74] tandis que nous avons choisi de séparer formes urbaines et bâtiments, et donc les paramètres qui leur sont relatifs.

Cette section décrit tout d'abord l'ensemble des caractéristiques conçues et utilisées par la littérature scientifique autour des formes urbaines (voir sous-section III.1) et des bâtiments (voir sous-section III.2) avant de lister d'autres paramètres transverses ayant trait à la fois aux formes urbaines et aux bâtiments en prenant l'exemple de la porosité (voir sous-section III.3). Enfin, nous listons plus exhaustivement les paramètres intégrés dans notre création des archétypes (voir sous-section III.4).

III.1. Description des caractéristiques des formes urbaines

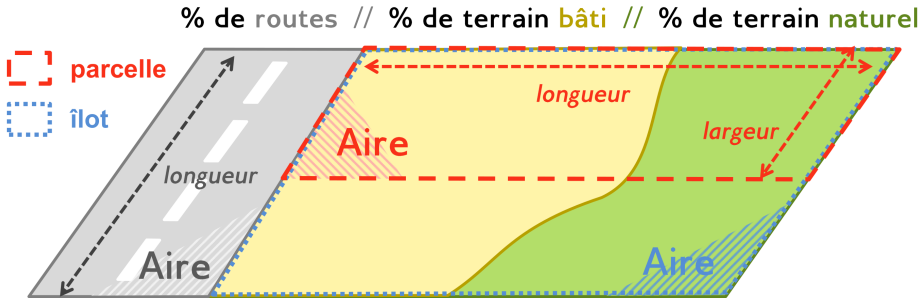


Figure 2.16 – Résumé des paramètres principaux utilisés pour la caractérisation des formes urbaines.

À travers l'étude de la densité que nous avons faite dans la section IV.3 du chapitre 1, p. 63, nous avons déjà exhibé un ensemble de paramètres variés qui s'appliquent soit aux bâtiments, soit à la caractérisation des formes urbaines. Ainsi, les densités suivantes ont été mentionnées : d'occupation des sols (mesurée par le coefficient d'occupation des sols ou COS), bâtie (mesurée par le coefficient d'emprise au sol ou CES) nette ou brute, de population ou d'emplois, de logements, végétale, et enfin perçue par les habitants. Les *formes urbaines* ne se résument pas à la densité et il convient de compléter ces éléments pour en obtenir une meilleure intégration dans la création de nos archétypes. Nous regroupons les paramètres par thématique et nous nous attardons donc ici sur les *parcelles*, les *espaces naturels*, les *routes*, la *présence de bâtiments publics* et la *variété d'usage des*

74. Les cinq catégories choisies par l'autrice sont les suivantes : « (1) insertion dans un tissu urbain, (2) espace public (y compris le réseau de voiries), (3) découpage foncier, (4) bloc et (5) bâtiment » [M. Bonhomme (2013)].

sols, afin d'établir une liste de paramètres qui seront utilisés par la suite pour la construction de nos archétypes de formes urbaines.

III.1.a. Les parcelles

Une parcelle est une « pièce de terre d'un seul tenant formant un tout au regard de la propriété, de l'exploitation ou de la culture [75] ». La figure 2.17 affiche trois quartiers de la métropole de Bordeaux avec trois profils de parcelles distincts ainsi que les bâtiments recouvrant celles-ci : on note par exemple que le centre-ville de Bordeaux a des parcelles de petite taille et entièrement occupées par des bâtiments tandis que les parcelles du quartier sud de Martignas-sur-Jalles sont bien plus grandes (en superficie) et proportionnellement peu construites. Enfin, le quartier Corbiac de Saint-Médard-en-Jalles présente un profil intermédiaire, avec des parcelles plus proches de la forme d'un carré.

Les principaux paramètres caractérisant les parcelles sont de nature géométrique, comme la *longueur*, la *largeur* et le *facteur de forme*, ce dernier étant calculé comme le rapport entre les deux précédents paramètres ce qui donne des valeurs élevées lorsque la parcelle est allongée et des valeurs faibles (proches de 1) quand la parcelle est proche du carré. A priori, les caractéristiques des parcelles sont fortement liées à la densité d'une forme urbaine : dans les centres historiques, les parcelles sont de taille très réduite là où elles sont plus étendues dans les zones périurbaines ou rurales.

Pour calculer cette valeur, il faut identifier ce que sont la longueur L et la largeur l d'une parcelle. Toutes les parcelles n'étant pas rectangulaires, on calcule d'abord la *bounding box* des parcelles [76], c'est-à-dire le plus petit rectangle circonscrit à la forme de la parcelle [77]. Un tel procédé conduit à des écarts plus ou moins importants et relatifs à la différence entre la forme de la parcelle et un rectangle. L'obtention d'un tel rectangle permet ensuite de récupérer pour chaque parcelle, la longueur et la largeur par la résolution d'un trinôme du second degré associé [78]. Ces deux paramètres donnent ensuite immédiatement le facteur de forme, défini comme L/l, l étant bien toujours non nul sans quoi le rectangle serait vide, condition qui est vérifiée lors de l'extraction des *bounding boxes*.

III.1.b. Les espaces naturels

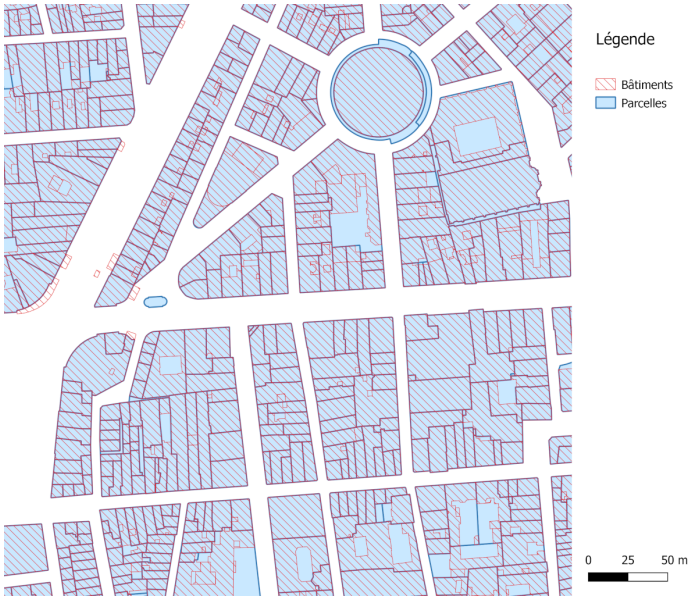
La présence d'espaces naturels, de verdure, est absolument nécessaire au bien-être humain mais aussi aux écosystèmes urbains. La *superficie*, le *ratio* de surface par rapport aux IRIS et leur *répartition* entre différentes tailles sont des paramètres qui aident à différencier la ville dense et les banlieues ou les zones ru-

75. D'après le Trésor de la Langue Française informatisé (accessible sur http://atilf.atilf.fr/tlf.htm, page consultée le 6 décembre 2020).

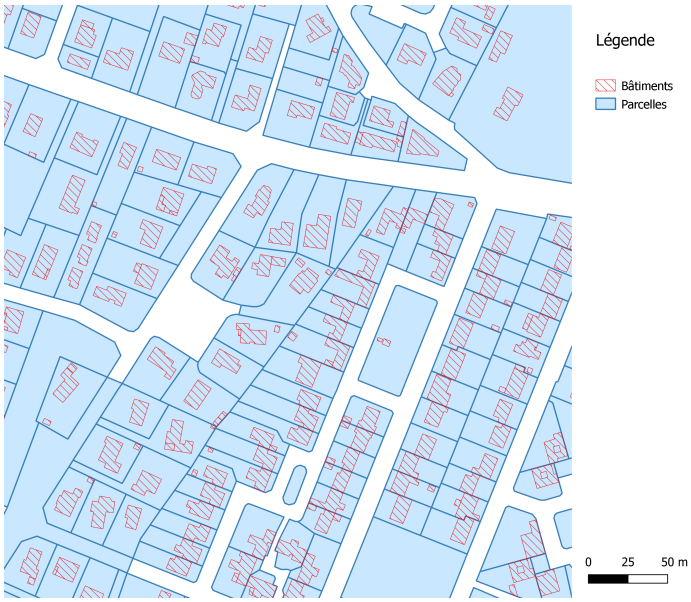
76. L'ensemble des sources de données pour ces calculs sont présentées dans les tableaux à la fin de cette partie (voir tableaux 2.3 et 2.4).

77. Pour ce faire, on applique des méthodes disponibles dans les logiciels utilisés (voir section II.2, p. 118).

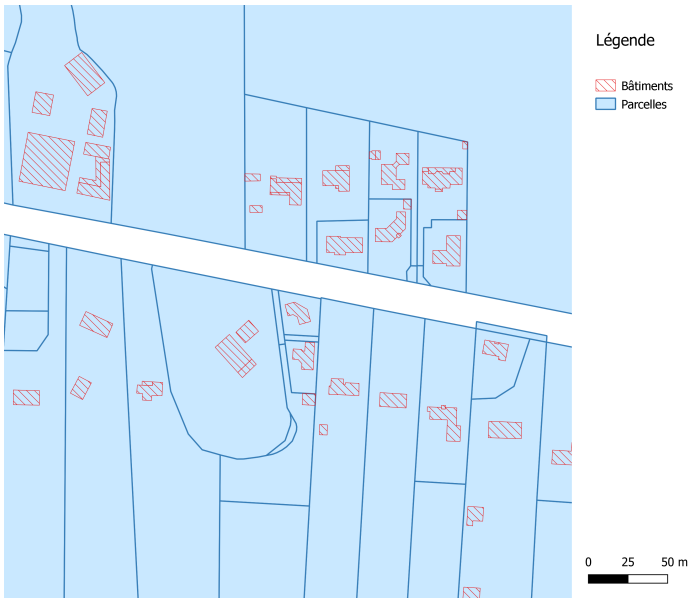
78. Si on note l et L la largeur et la longueur resp., A et P l'aire et le périmètre (connus par le calcul de *bounding box*) resp., on trouve trivialement à partir de $A = l \times L$ et $P = 2(l + L)$, avec $0 < l \leq L$ qu'il n'existe qu'une seule paire (l, L).



(A) Centre-ville de Bordeaux



(B) Quartier Corbiac de Saint-Médard-en-Jalles



(C) Quartier sud de Martignas-sur-Jalles

FIGURE 2.17 – Cartes des parcelles dans trois zones différentes (échelles identiques).

rales [Adolphe (2002), Agra de Lemos Martins (2014), Danielaini et al. (2017), J. Gonçalves et al. (2017) et Huang et al. (2016)]. Ces données ont été récupérées à partir de la BDTOPO mais aussi de couches géographiques de la ville de Bordeaux sur les parcs. La figure 2.18 présente deux cartes des surfaces d'espaces naturels en absolu (à gauche) et relativement à la surface des IRIS (à droite). On y perçoit bien l'existence de zones plus végétalisées à l'ouest de la métropole.

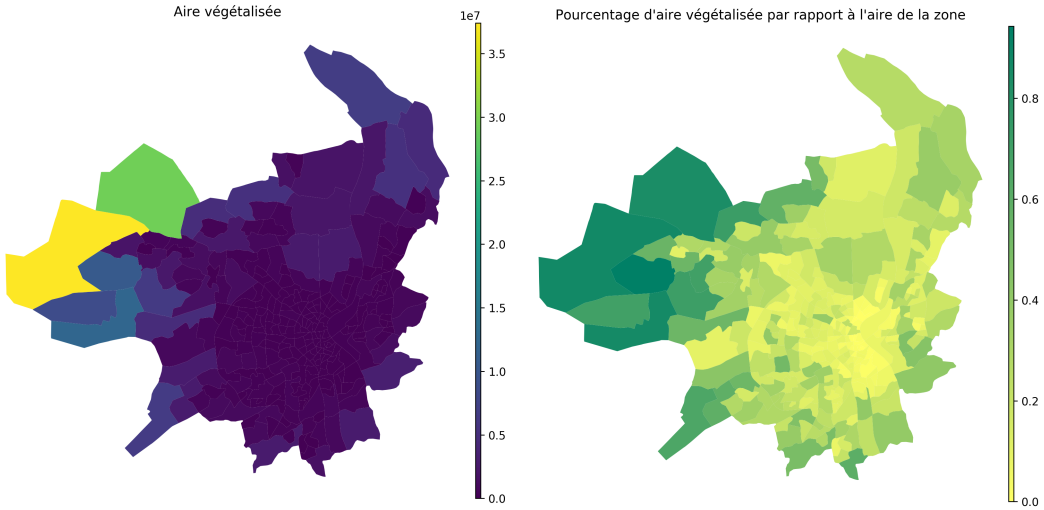


Figure 2.18 – Carte des surfaces d'espaces naturels en absolu en m² (*gauche*) et en relatif par rapport aux surfaces d'IRIS en ratio (*droite*). On remarque que l'usage du ratio plutôt que de la valeur absolue rend la carte plus lisible.

III.1.c. Les routes et les transports

La question du transport est capitale dans l'organisation de la ville moderne comme nous l'avons vu précédemment. Il faut donc trouver moyen de tenir compte de cette problématique dans la création de nos archétypes urbains [79]. Nous avons choisi de nous restreindre aux infrastructures pour la caractérisation des transports, éléments qui restent *a priori* pérennes dans la caractérisation d'une forme urbaine. La *diversité* des routes, leur *type*, leur *largeur*, leur *longueur* sont ainsi de bons paramètres pour représenter la structure du réseau.

Dans un deuxième temps, on cherchera à rendre compte plus précisément d'autres notions telles que l'accessibilité, en utilisant par exemple le logarithme de la distance moyenne à l'arrêt de transport en commun le plus proche [80].

Les données sont extraites encore une fois de la BDTOPO et de sa couche des

79. Dans leur approche très complète, De Miglio et al. (2016b) utilisent une demande de transport qu'ils associent à la zone d'origine du flux pour caractériser la dynamique de transports de celles-ci et intégrer dans leur modélisation le besoin de mobilité des différents quartiers [De Miglio et al. (2016b)]. Nous ne pouvons pas procéder de la sorte, ni y intégrer de notions d'engorgement ou de flux qui ne resteraient plus valides sur le long terme.

80. Le passage au logarithme améliore la séparabilité des éléments et diminue les écarts avec les valeurs extrêmes. La figure 2.19 illustre ce principe : la majeure partie des valeurs est concentrée dans une petite portion de l'intervalle total des valeurs dans le cas de la distance moyenne brute (en haut) tandis que le passage au logarithme permet de mieux répartir les données (en bas). Ainsi, là où 80 % des données sont situées entre 0 et 600 m environ et 20 % entre 600 et 3 000 m dans le cas normal, le passage au logarithme permet que 80 % des données soient situées entre 4,5 et 6,8 et 20 % entre 6,8 et 8. Cela facilite donc la séparation des éléments les uns des autres.

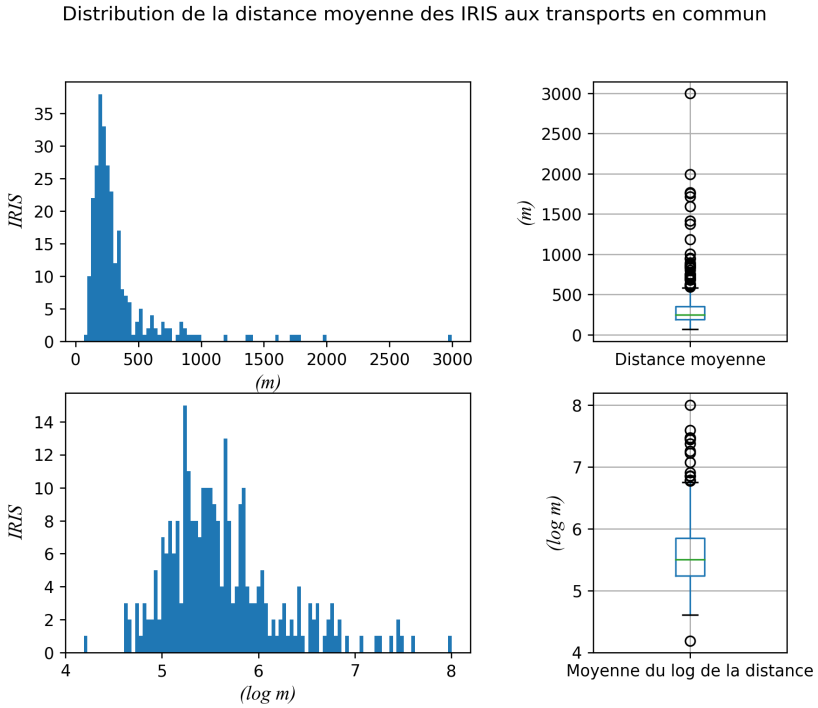


FIGURE 2.19 – Distance moyenne aux arrêts de transport en commun en `m` (*haut*) et en `ln m` (*bas*).

routes. Toutefois, un peu de travail est encore nécessaire pour récupérer la taille des routes. En effet, une des colonnes, censée contenir la largeur des segments, est souvent vide.

Estimation des largeurs de routes manquantes

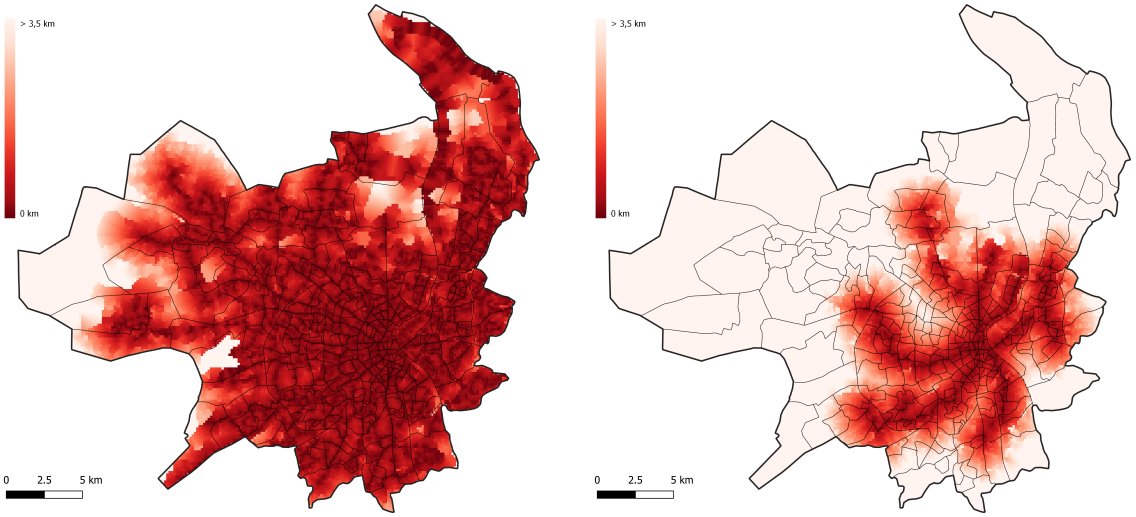
Paramètre	Coefficient
importance de la route	-21,3978
nombre de voies	18,9637
altitude du sommet final du tronçon	6,0856
altitude du sommet initial du tronçon	-5,2340
longueur	2,7065
position par rapport au sol	-1,1046
borne gauche de fin de voie	-0,5274
borne gauche de début de voie	-0,0179
précision planimétrique	0,0000
précision altimétrique	0,0000
borne droite de début de voie	0,0000
borne droite de fin de voie	0,0000

TABLEAU 2.2 – Coefficients calculés par la technique Lasso pour l'estimation de la largeur de la route.

Pour ce faire, nous avons donc utilisé la technique du Lasso qui permet d'estimer une valeur à partir d'autres paramètres en s'appuyant sur les données existantes [FRIEDMAN et al. (2010) et S.-J. KIM et al. (2007)]. Cette technique de *machine-learning* est efficace dans une telle situation où nous avons relativement peu de données (80 806 routes sur la métropole de Bordeaux) mais où quelques paramètres devraient être pertinents (l'importance de la route et le nombre de voies

permettent normalement d'estimer la largeur d'une route). Nous avons utilisé les autres paramètres disponibles : *précision planimétrique*, *précision altimétrique*, *nombre de voies*, *position par rapport au sol*, *sens*, *borne gauche de début de voie*, *borne droite de début de voie*, *borne gauche de fin de voie*, *borne droite de fin de voie*, *altitude du sommet initial du tronçon*, *altitude du sommet final du tronçon*, et enfin la *longueur*. Les résultats sont plutôt bons et donnent un score d'entraînement de 0,8884 et un score de test de 0,8638 [81]. Les douze *features* – commme elles sont appelées en *machine-learning* – ne sont pas utilisées et les coefficients sont indiqués dans la table 2.2. On voit très clairement que les deux paramètres *nombre de voies* et *importance de la route* sont les éléments ayant le poids le plus important dans l'estimateur, ce qui est tout à fait légitime puisque la largeur d'une route est fortement corrélée au type de route (nationale, autoroute, etc.) et à son nombre de voies (la largeur des voies étant standardisée pour la plupart des routes) [82]. Les autres paramètres sont annexes (l'emplacement des bornes de début et de fin de voie, la position par rapport au sol…) et influencent bien moins l'estimateur.

Estimation de la distance aux transports en commun



(A) Bus et tram (B) Tram seul

FIGURE 2.20 – Carte de proximité aux arrêts de transport en commun.

Pour calculer la distance aux axes de transport, nous avons procédé de la façon suivante : après avoir créé une grille de points de 150 m d'intervalle, un algorithme de parcours de graphe calcule le chemin le plus court entre les points de la grille d'une part et les arrêts de transport en commun situés à moins de 3 km à vol d'oiseau du point de départ (pour diminuer le temps de calcul) d'autre part. Pour chacune de ces paires, on utilise la libraire `GraphHopper` [83] pour estimer la distance (ou le temps de trajet à pied) à travers le réseau de routes de la métropole [84]. Le meilleur candidat, au sens de l'arrêt le plus proche, est choisi

81. Ces scores correspondent à la valeur du coefficient de détermination ou R^2 qui mesure l'adéquation entre les valeurs estimées par un modèle statistique et les valeurs connues associées pendant la phase de test du modèle dans une situation d'apprentissage supervisé.

82. Il est légitime de questionner le fait que les signes de ces deux contributions soient opposés mais cela est simplement lié au fait que l'importance est codée par des valeurs discrètes allant de 1 à 6, la valeur 1 correspondant aux autoroutes et la valeur 6 aux routes non répertoriées.

83. *Cf.* https://www.graphhopper.com/ (consulté le 29 septembre 2020).

84. Ce réseau de routes est extrait des couches de routes de la BDTOPO de l'IGN (voir tableau 2.3,

pour chaque point de la grille et la distance correspondante est sauvegardée. Lorsque la distance retenue est supérieure à 3,5 km, cela signifie que celui-ci est « hors de portée » d'un transport en commun à pied [85]. On obtient alors les cartes présentées dans la figure 2.20. On agrège enfin à l'échelle des IRIS pour avoir une distance moyenne.

III.1.d. Autres paramètres sur les formes urbaines

Parmi les autres éléments nécessaires, on trouve la présence ou non d'équipements publics (lesquels et combien), de zones d'activités économiques (ratio de superficie), et plus généralement la distribution de l'utilisation des sols entre les usages (logements, bureaux, entrepôts, espaces naturels, etc.) [Tornay et al. (2017b)].

L'homogénéité ou l'hétérogénéité d'occupation des sols en elles-mêmes sont aussi une information. Elles peuvent être par exemple quantifiées par l'utilisation d'un indicateur d'entropie, comme celui inspiré du calcul de Shannon (1948) ou d'autres versions ultérieures [Carranza et al. (2007) et Shannon (1948)]. Cet indicateur est très largement appliqué sur les données du projet Copernicus, dont *Corine Land Cover* et l'*atlas urbain* et permettent de déterminer les quartiers spécialisés, c'est-à-dire plutôt homogènes en termes d'occupation des sols [Cegielska et al. (2019) et Huang et al. (2016)]. Par exemple, le type d'usage du sol d'un centre historique est plutôt uniforme tandis que les zones périurbaines vont avoir des occupations plus variées. L'entropie se calcule comme suit, en notant I l'ensemble des usages possibles et ρ_i la proportion de surface utilisée pour l'usage $i \in I$:

$$H = -\sum_{i \in I} \rho_i \ln \rho_i$$

III.2. Description des caractéristiques des bâtiments

Dans un deuxième temps, nous nous sommes penchés sur la caractérisation des bâtiments de la ville et la récupération de paramètres les décrivant. Le grand nombre d'études se penchant sur l'estimation de la consommation énergétique des bâtiments a guidé notre approche et notre sélection de paramètres.

III.2.a. Les caractéristiques morphologiques des bâtiments

De même qu'il était pertinent de regarder la géométrie des parcelles, il est intéressant de se pencher sur la morphologie des bâtiments, en ajoutant pour leur représentation une troisième dimension verticale. Si l'on s'intéresse aux bâtiments existants comme c'est le cas dans la logique de notre méthodologie [86],

p. 142).

85. Les calculs pourraient être faits pour des trajets à vélo ou à trottinette électrique avec des valeurs différentes, par exemple dans le cadre d'une politique favorisant leur utilisation.

86. Cette approche pourrait être théorique : Z. Li et al. (2016) choisissent ainsi d'étudier des formes théoriques qu'ils combinent avec une utilisation et une hauteur de bâtiment pour évaluer

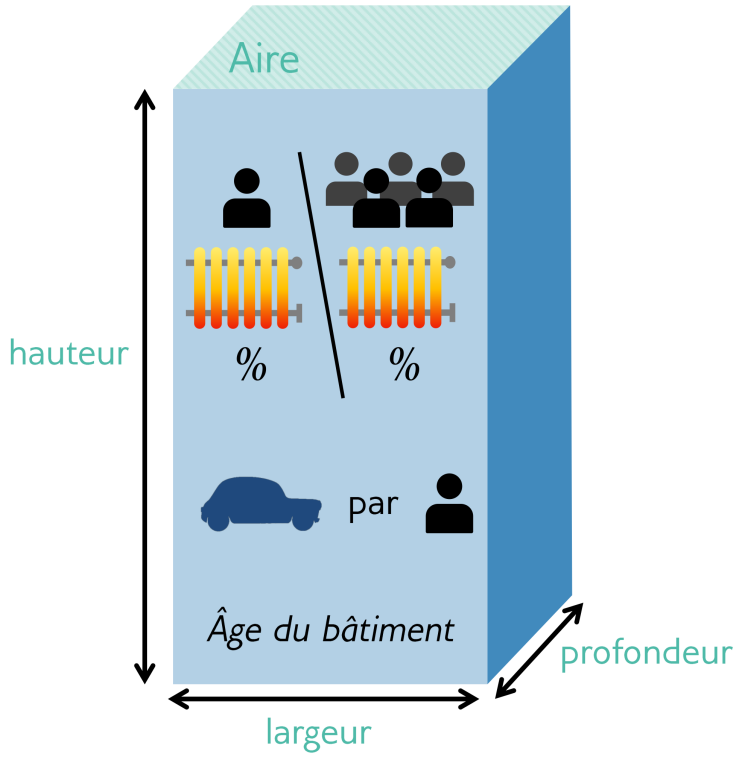


FIGURE 2.21 – Résumé des paramètres principaux utilisés pour la caractérisation des bâtiments. L'aire indiquée en haut du bâtiment est en fait celle de l'emprise au sol.

la forme de l'empreinte au sol peut être calculée en appliquant une technique à partir de *bounding boxes* similaire à celle présentée pour les parcelles dans la section III.1.a du présent chapitre, p. 126.

Le volume ou le ratio surface sur volume est également souvent utilisé [CAPUTO et al. (2013), MUTANI et al. (2016) et NOUVEL et al. (2015)] : AKSOEZEN et al. (2015) trouvent ainsi que le pouvoir explicatif du volume dans la consommation d'énergie est de 0,63 en utilisant un arbre CHAID [87] [AKSOEZEN et al. (2015)], ce que confirment en partie CHRISTEN et al. (2012). D'après ces derniers, l'effet du volume sur la consommation décroît plus le volume est grand [CHRISTEN et al. (2012)].

La forme du toit (plat ou en pente) [MONTEIRO et al. (2017), NOUVEL et al. (2015) et TORNAY et al. (2017b)] et son orientation [DE MIGLIO et al. (2016b) et NOUVEL et al. (2015)] sont également des facteurs pertinents pour l'estimation de la consommation énergétique avec plus ou moins de finesse. Par exemple, DE MIGLIO et al. (2016b) augmentent (respectivement diminuent) simplement la consommation quand la façade principale est orientée nord (respectivement sud). AKSOEZEN et al. (2015) ajoutent la compacité des bâtiments dans les facteurs (définie comme

l'influence des différents paramètres sur la consommation d'énergie et production de CO_2. Les archétypes proposés sont bien sûr largement inspirés de l'existant : rectangle, cour intérieure, cour ouverte, bâtiment en croix, en I ou en L, triangle, étagé (en escalier)... Chacun des types est alors caractérisé à la fois par une empreinte au sol mais aussi par une forme géométrique spécifique utilisée dans le cadre de leur simulation de consommation d'énergie [Z. LI et al. (2016)]. Nous avons expliqué plus haut pourquoi il était plus pertinent pour nous de nous appuyer sur des bâtiments réels plutôt que fictifs dans notre démarche proche de l'urbanisme.

87. CHAID ou *Chi-Square Automatic Interaction Detector*.

le ratio entre la *surface extérieure* et le *volume* des bâtiments) [88].

Quand on regarde la géométrie d'un bâtiment, il est aussi intéressant de regarder sa position relative par rapport aux autres bâtiments proches. En effet, des phénomènes de mitoyenneté et d'ombrage (par des bâtiments ou d'autres objets) peuvent changer la demande et sont donc parfois considérés dans les approches [89] [Monteiro et al. (2017), Ratti et al. (2005) et Tornay et al. (2017b)]. Nouvel et al. (2015) appellent cela la « *surface limite* ».

Application d'une fonction de convolution pour l'estimation des données manquantes

Dans notre cas, les données de hauteur de bâtiments étaient partiellement manquantes et nous avons comblé les valeurs absentes en appliquant une fonction d'aggrégation spatiale ou de convolution spatiale : pour chaque bâtiment dont la hauteur manque, un cercle de 100 mètres de diamètre est tracé et la moyenne des hauteurs des bâtiments présents dans ce cercle est calculée et assignée au bâtiment concerné. Un deuxième passage peut être fait avec un cercle de 500 mètres lorsque le bâtiment est isolé (notamment dans les zones rurales). La figure 2.22 présente les résultats dans une partie de la ville de Bordeaux.

Pour évaluer la pertinence de notre approche, nous avons sélectionné 8 000 bâtiments au hasard parmi ceux dont la hauteur est disponible dans la BDTOPO. En appliquant le même principe, on obtient l'histogramme d'erreurs relatives présenté sur la figure 2.23 et la valeur de 0,5416 pour le coefficient de détermination R^2 [90]. Cette valeur suffit pour notre approche et une étude plus approfondie des résultats statistiques montrent que les grandes hauteurs dans le tirage aléatoire réalisé sont légitimement difficiles à estimer.

III.2.b. L'âge des bâtiments

L'âge des bâtiments, ou l'année à laquelle ils ont été construits, est une caractéristique très importante dans le paysage urbain [Caputo et al. (2013), Cerezo et al. (2017) et Ratti et al. (2005)]. Cette information transmet déjà une idée grossière des formes urbaines en se replongeant dans les grandes périodes de construction et de politiques urbaines du pays ou de la région. Ainsi, on associe les grands ensembles aux années 50 et 60 et leur remise en cause aux années 70 [91].

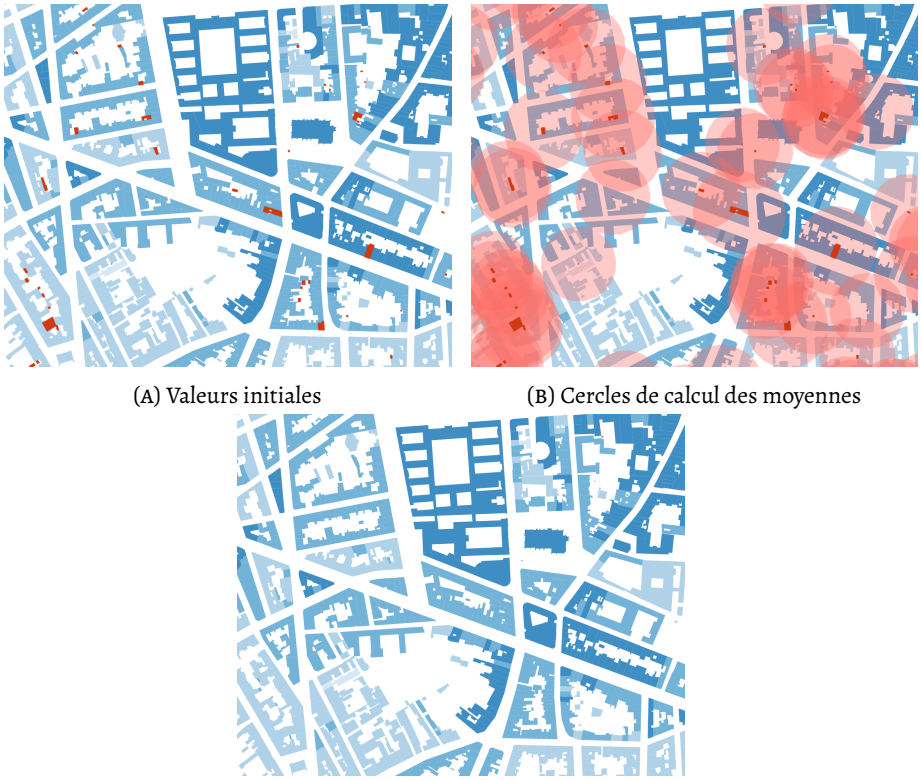
Le découpage temporel est fait à des échelles compatibles avec les données disponibles : ainsi, les études séparent les périodes de construction en neuf [Mutani

88. *Cf.* http://www.energiepositive.info/fr/reduire-besoin/construire-compact.html (consulté le 29 septembre 2020).

89. Certains vont plus loin et utilisent des scans lidar pour obtenir « une morphologie urbaine (ombrage et mise à l'abri) [et] une morphologie de bâtiment (archétype et forme) » (« *urban morphology (shading and sheltering) [and] building morphology (archetype and form)* ») [Christen et al. (2012)].

90. La valeur de l'erreur quadratique moyenne est de 2,5036 et celle de l'erreur absolue moyenne est de 1,0747.

91. On pourra par exemple se référer pour ce changement de discours officiel à la circulaire du 21 mars 1973 traitant des grands ensembles dans laquelle il est écrit en introduction : « *Après les efforts considérables accomplis pour augmenter la production massive de logements neufs, il est aujourd'hui indispensable de répondre plus efficacement aux aspirations à une meilleure qualité de l'habitat et de l'urbanisme, et de lutter contre le développement de la ségrégation sociale par l'habitat* » [Guichard et Bonnet (1973)]



(A) Valeurs initiales (B) Cercles de calcul des moyennes

(C) Résultats

FIGURE 2.22 – Résultats du procédé d'estimation des valeurs absentes appliqué aux bâtiments dont les hauteurs manquaient dans la BDTOPO (en rouge) : la valeur absente est remplie par la moyenne des hauteurs des bâtiments dans sa proximité directe (*i.e.* dans un cercle de 100 mètres de diamètre en rouge pâle sur la carte de droite).

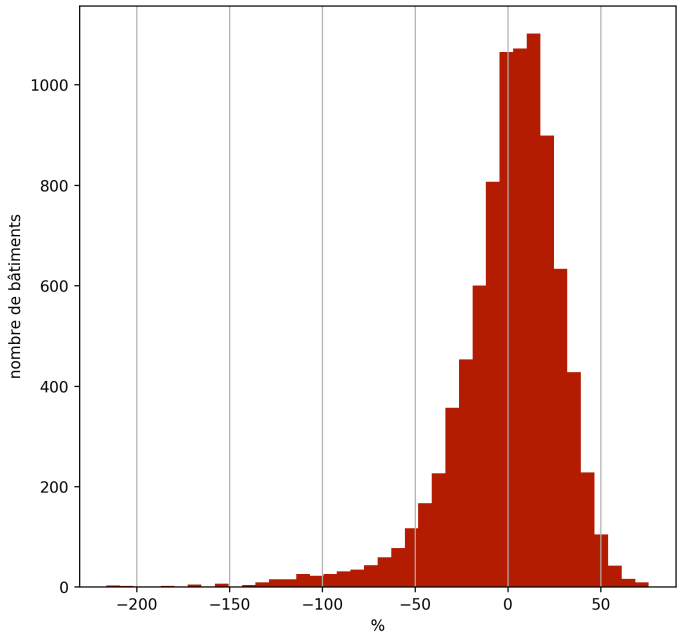


FIGURE 2.23 – Histogramme des erreurs résultant de l'essai d'application de la technique sur 8 000 bâtiments tirés au hasard dont la hauteur est renseignée dans la BDTOPO.

et al. (2016)], huit [Raux et al. (2005)], sept [Caputo et al. (2013) et Tornay et al. (2017b)], cinq [Mastrucci et al. (2014) et Monteiro et al. (2017)], trois (en séparant selon s'il y a eu rénovation ou non) [Cerezo et al. (2017)], voire deux [Delmastro et al. (2016)]. Les années pivot sont régulièrement au milieu du XIX^{ème} siècle (1850), les deux guerres mondiales (1914 ou 1915, 1948 ou 1949), la fin des années 60 (1967-1968), les années 80 et 2000.

III.2.c. Informations sur la consommation énergétique

Dans un premier temps, la principale caractéristique énergétique d'un bâtiment (ou d'un groupe de bâtiments) est sa consommation annuelle d'électricité et de gaz [Mastrucci et al. (2014)]. Le type de chauffage (collectif, individuel ou individuel électrique par exemple) [Cerezo et al. (2017) et Raux et al. (2005)], parfois combiné à la climatisation et à la ventilation [Reinhart et Cerezo Davila (2016)], ou la source exacte de fuel [Kellett et al. (2013), Marchal (2008), Portella (2012) et Raux et al. (2005)] peuvent également intervenir et affiner la représentation du système.

Dans un deuxième temps, il est fréquent de trouver le ratio `fenêtre sur mur`[92] [Cerezo et al. (2017), Nouvel et al. (2015) et Tornay et al. (2017b)], ainsi que des paramètres beaucoup plus précis sur les bâtiments comme les matériaux ou la résistance thermique des murs (obtenue à partir des normes légales dans lesquelles les bâtiments se classent), le taux de ventilation (selon la régulation encore) ou encore l'étanchéité à l'air, les matériaux utilisés de manière générale, l'efficacité des systèmes énergétiques présents, la chaleur des occupants (fortement lié au type d'occupation), de l'éclairage et des appareils électriques (en prenant des valeurs normées) [Mata et al. (2014), Portella (2012) et Tornay et al. (2017b)].

Une approche intéressante consiste à raisonner en termes d'aires passives (naturellement ventilées et touchées par la lumière du jour et du soleil) et non passives (c'est-à-dire mécaniquement ventilées ou éclairées artificiellement par exemple). Cela permet de remplacer notamment les facteurs surface sur volume couramment utilisés, limités par la variation de leur efficacité selon la saison d'estimation [Ratti et al. (2005)]. Cela requiert néanmoins un modèle 3D même grossier des bâtiments d'une ville.

D'autres éléments ont une influence sur la performance énergétique d'un bâtiment. Si le bâtiment a déjà été rénové, l'âge ne suffit pas à bien rendre compte de sa catégorie générale [Cerezo et al. (2017) et Nouvel et al. (2015)]. La présence d'un grenier (chauffé ou non, ajouté *a posteriori* ou d'origine) et d'un sous-sol sont également parfois intégrés dans la modélisation ou la simulation [Nouvel et al. (2015)].

Enfin, lorsque l'étude s'intéresse à la comparaison de plusieurs villes ou à des calculs sur des zones géographiques différentes, un paramètre décrivant les climats respectifs des terrains est intégré [Ratti et al. (2005)], comme la zone climatique en s'appuyant par exemple sur la terminologie *Local Climate Zone* de Stewart et Oke (2012) [Portella (2012) et Raux et al. (2005)].

92. Généralement appelé « *window-to-wall* » dans la littérature.

En France, il se trouve que les logements font obligatoirement l'objet d'un *Diagnostic de Performance Énergétique* (DPE) lors de la vente du bien depuis 2006 [Ministère de la transition écologique et solidaire (2020)]. L'ADEME [93] maintient une base de données recensant un grand nombre des résultats de ces DPE [94] [ADEME (2020)].

III.2.d. L'usage des bâtiments

Les approches varient pour classifier les *usages des bâtiments*. Logements ou bureaux ? [Caputo et al. (2013)] Logements et non logements ? [Kellett et al. (2013) et Monteiro et al. (2017)] Il est aussi possible de séparer logement individuel du logement collectif [Raux et al. (2005)], voire même du logement social [Marchal (2008)]. Certains vont même parfois plus dans le détail en différenciant résdentiel, bureaux, entrepôts [Cerezo et al. (2017)] ou encore commercial, loisirs, logement multi-familles, non résidentiel, bureaux, résidentiel, sports-culture-loisirs, logement mono-famille, maison en terrasse, et autres occupations [De Miglio et al. (2016b), Mata et al. (2014) et Portella (2012)]. Tornay et al. (2017b) utilisent une autre classification « *residential, office, commercial, school, hospital, industrial, agricultural, greenhouse, religious, sport facility, castle, and nonheated buildings* ». D'autres mélangent parfois la forme du bâtiment avec le type d'habitations qu'il abrite : Rochard et al. (2015) séparent les classes de bâtiments en quatre, entre la maison individuelle détachée, la maison mitoyenne, un petit immeuble de logements collectifs, et un grand immeuble de logements collectifs [Rochard et al. (2015)].

Pour déterminer le ratio entre logements et locaux professionnels, M. Bonhomme (2013) a une approche originale en se basant sur la densité bâtie (voir figure 2.24). Les données étant peu géolocalisées ou insuffisantes, l'autrice définit que les zones pavillonnaires sont mono-fonctionnelles en logement. Pour le reste, M. Bonhomme (2013) calcule le rapport population sur surface bâtie d'une maille de la grille préalablement définie (à partir de la BDTOPO), ce qui donne une valeur de densité. Si celle-ci est trop faible, c'est que la surface bâtie est utilisée pour des bureaux et non des logements. Après avoir trié les densités par ordre croissant, il est alors possible de sélectionner les bâtiments ayant une densité faible comme bureaux et le reste comme logements pour obtenir le même ratio logement/bureau que celui estimé par les mesures données par des études externes sur la région considérée. M. Bonhomme (2013) compare enfin les résultats avec une carte typologique réalisée par l'agence d'urbanisme IAU sur l'Île-de-France [M. Bonhomme (2013)].

III.2.e. Les caractéristiques démographiques et sociales

Outre l'enveloppe physique d'un bâtiment et ses environs, ce sont les habitants qu'il faut considérer dans notre approche. La densité au m² de terrain, au m² de sol, de foyers, d'emplois sont autant de paramètres qui aident à évaluer les caractéristiques d'un habitat. La plupart du temps, c'est le nombre d'occupants

93. ADEME ou Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

94. Cette base a notamment été rendue publique pendant l'été 2020 [Boughriet (2020)]. Avant cela, elle était partiellement accessible aux entités de recherche.

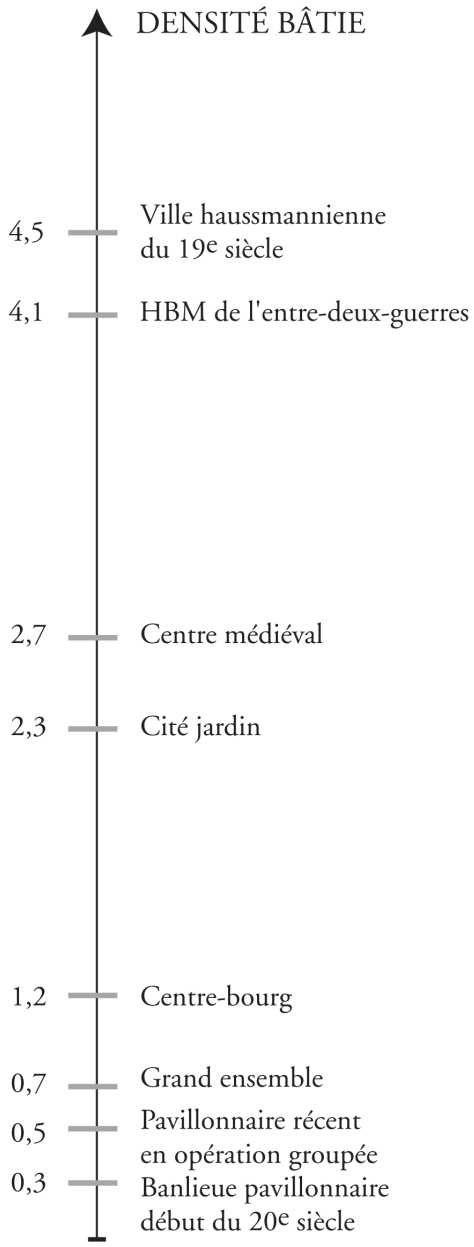


FIGURE 2.24 – Échelle des densités selon les types : deux types a priori très distincts, la ville haussmanienne et les HBM (ou *habitat à bon marché*) de l'entre-deux-guerres, dans leurs formes et dans les bâtiments associés ont des densités comparables, ce qui peut surprendre (source : ADAM et MOULINIÉ (2005a) et M. BONHOMME (2013)).

qui est intégré dans la création d'archétypes et l'estimation de la consommation énergétique [Mastrucci et al. (2014)]. Raux et al. (2005) mentionnent par exemple une étude (datée de 2005 et utilisant des données de 1996) sur l'effet que va avoir « la taille du ménage [le nombre de personnes dans le foyer] sur les consommations d'énergie domestique par personne », à la fois pour l'électricité et le gaz. En réactualisant le calcul, ils estiment toutefois que c'est la surface du logement qui « *intègre a priori l'ensemble des paramètres : le type, la taille du ménage, les données économiques du coût de l'acquisition ou de la location.* » D'autres éléments sont en outre disponibles comme la répartition entre chauffage collectif, individuel et individuel électrique (déjà cité dans la catégorie énergétique) [Raux et al. (2005)], ou encore la proportion de foyers disposant d'une, de deux voitures ou plus.

Delmastro et al. (2016) prennent en compte le potentiel de rénovation lorsque le ménage le peut avec *ses* revenus. Hache et al. (2017) intègrent les caractéristiques du foyer et concluent que les paramètres impactant la consommation de manière la plus significative sont : en premier lieu, la taille du logement, son type et le choix de fuel de chauffage, ce qu'ils résument comme étant les caractéristiques techniques du logement ; ensuite, le revenu du foyer ; enfin, l'âge du représentant du foyer, le type de famille et le type d'habitant (propriétaire ou locataire), ce qu'ils résument comme étant les caractéristiques du foyer [Hache et al. (2017)].

III.3. Autres indicateurs spécifiques : l'exemple de la porosité

Il existe aussi la possibilité de réaliser des calculs bien plus complexes sur les formes urbaines ou les bâtiments afin d'en extraire des caractéristiques. En effet, certaines notions, chères aux yeux des urbanistes ou des élus, ne sont pas associées intrinsèquement avec un ou plusieurs indicateurs et doivent être évaluées différemment, en proposant la création de nouveaux paramètres, en agrégeant plusieurs paramètres existants, ou encore en refusant d'utiliser des paramètres quantitatifs.

La notion de porosité ou perméabilité du tissu urbain est ainsi un exemple intéressant de paramètres transverses car touchant à la fois aux bâtiments et aux formes urbaines. Elle est en outre le sujet d'une partie de la réflexion des urbanistes aujourd'hui dans leur conception d'un quartier.

Cette notion peut être définie comme la facilité ou non offerte par une forme urbaine d'être traversée [Bentley et al. (1989) et Boucher et al. (2013)]. Derrière cette possibilité offerte au passant et à l'habitant de franchir les îlots de bâtiments, on peut voir une ouverture des choix et donc une plus grande liberté des usagers [Bentley et al. (1989)]. Cette question touche celle de l'accessibilité, élément central dans le développement des modèles LUTI [95] et dans leurs défis récents [Acheampong et Silva (2015)]. Dans le contexte actuel, la question de l'accessibilité se concentre sur les déplacements piétonniers et cyclistes, correspondant à des modes de déplacement dits doux : la facilité de se déplacer à travers un quartier est surtout impactante pour ces « moyens de transport ». Faire

95. *LUTI* ou Land-Use Transport Interaction. On pourra se référer à la section V.2.b du chapitre 1, p. 77, pour plus de détails.

quelques centaines de mètres supplémentaires en voiture dissuade en effet rarement la personne d'effectuer son trajet tandis que la difficulté d'accès à certaines zones peut inciter l'individu à préférer la voiture au vélo ou à la marche, voire, dans le cas de trajets quotidiens (domicile-travail) à abandonner les transports en commun face à la distance aux arrêts [Frumkin (2002)]. La question de la perméabilité est ainsi légitimement rattachée aux modes doux [Dijkstra et al. (2016)]. Comment la caractériser ? Plusieurs paramètres sont pertinents : la taille des îlots de bâtiments (en aire mais aussi en longueur), la proportion de routes sur une surface donnée, le nombre d'intersections, le nombre de voies sans issue, etc. [Boucher et al. (2013)]

La porosité, cette fois au sens de capacité de l'air de traverser un îlot, peut également être vue verticalement dans le cadre d'études se concentrant sur les questions de climat par exemple. Adolphe (2001) s'appuie sur le rayon équivalent hydraulique [96] défini ici de la façon suivante avec h la hauteur moyenne des bâtiments entourant la route (en prenant en compte les parcelles non construites) et l la largeur moyenne de la route [Adolphe (2001)] :

$$r_h = \frac{lh}{1+h} \tag{2.1}$$

Ce rayon permet alors de différencier les profils de rues les uns des autres et d'obtenir un facteur de porosité défini tel que suit, les espaces ouverts étant par exemple des routes, des parcs ou des cours intérieures :

$$P = \frac{\sum_{i \in \text{espaces ouverts}} \pi r_{hi}^2 L_i}{\sum_{i \in \text{espaces ouverts}} V_i + \sum_{j \in \text{bati}} V_j} \tag{2.2}$$

avec « L_i la longueur et r_{hi} le rayon hydraulique équivalent de l'espace ouvert i, V_j le volume moyen du volume bati i et V_i le volume moyen de canopé au-dessus de l'espace ouvert i » [Adolphe (2001)] [97]. D'autres indicateurs existent pour caractériser le profil vertical et la morphologie des formes urbaines et des bâtiments, particulièrement au regard des problématiques d'ensoleillement et de passage du vent (la rugosité, la sinuosité, l'occlusivité, la compacité, la contiguïté, l'admittance solaire et la minéralisation) [Adolphe (2002) et Agra de Lemos Martins (2014)]. Nous ne les présenterons pas plus en détail ici étant donné la difficulté à obtenir les données pour leur calcul, ce qui contrevient à un de nos objectifs principaux. La porosité sélectionnée dans notre approche sera donc exclusivement celle relative à la forme urbaine, accessible à travers la taille des îlots, l'accessibilité des arrêts de transports en commun et les ratios « route sur surface ».

96. Le rayon hydraulique représente le rapport communément utilisé en physique des écoulements de l'aire dite « *mouillée* » (le liquide) sur le périmètre dit « *mouillé* » (paroi du conduit en contact avec le liquide) [Wikipédia (2019)].

97. « *L_i is the length of the open space i, r_{hi} is the equivalent hydraulic radius of the open space i, V_j is the mean volume of the built volume j, and V_i is the mean canopy volume above open space i* » [Adolphe (2001)].

III.4. La sélection définitive des paramètres utilisés pour la création des archétypes

Nous avons sélectionné 24 paramètres pour l'utilisation des sols regroupés par thématique dans le tableau 2.3 et 35 paramètres pour les bâtiments dans le tableau 2.4. Chacun de ces paramètres peut être ensuite visualisé sur une carte similaire à celles de la figure 2.25. Une partie des paramètres théoriques présentés précédemment, bien que pertinents pour notre approche, sont difficilement conciliables avec les contraintes que nous nous sommes fixées : construire des archétypes par une méthodologie ne s'appuyant que sur des données communes, faciles d'accès et gratuites (tout du moins pour une entité publique).

#	**Description**	**Références** (non exhaustif)	**Sources**
1.	Coefficient d'occupation des sols	Adam et Moulinié (2005a, 2005b, 2005c) et M. Bonhomme (2013)	IGN BDTOPO[1]
2, 3.	Coefficient d'emprise au sol et aire totale bâtie	Adam et Moulinié (2005a, 2005b, 2005c) et M. Bonhomme (2013)	IGN BDTOPO[1] et Bordeaux Métropole Open data[2]
4 à 6.	Aire moyenne (deux versions) et ratio d'espaces naturels	Adolphe (2002), Agra de Lemos Martins (2014), Danielaini et al. (2017), J. Gonçalves et al. (2017) et Huang et al. (2016)	IGN BDTOPO[1] et Bordeaux Métropole Open data[2]
7, 8.	Coefficient d'entropie (deux versions à partir d'Urban Atlas et de Corine Land Cover)	Huang et al. (2016)	Copernicus Urban atlas[3] et Corine Land Cover[4]
9 à 12.	Surface et longueur de route (en absolu et en relatif)	M. Bonhomme (2013) et J. Gonçalves et al. (2017)	IGN BDTOPO[1]
13 à 17.	Taille moyenne (largeur et longueur), facteur de forme, orientation et ratio de couverture des parcelles (m^2)	M. Bonhomme (2013)	IGN BDPARCELLAIRE[1]
18, 19.	Nombre et densité de parcelles	M. Bonhomme (2013)	IGN BDPARCELLAIRE[1]
20, 21.	Nombre et ratio de parcelles non vides	M. Bonhomme (2013)	IGN BDPARCELLAIRE[1]
22, 23.	Moyenne d'occupation des parcelles (toutes et uniquement celles non vides)	M. Bonhomme (2013)	IGN BDPARCELLAIRE[1]
24.	Nombre d'écoles par foyer	De Miglio et al. (2016a) et Mutani et al. (2016)	INSEE[5]

Tableau 2.3 – Paramètres rassemblés et utilisés pour caractériser les formes urbaines

[1] Cartes et données géographiques officielles de l'IGN.
[2] *Cf.* site public d'*OpenData de la métropole de Bordeaux* https://opendata.bordeaux-metropole.fr/ (consulté le 29 septembre 2020).
[3] *Cf.* site de l'*Urban atlas* https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas (consulté le 29 septembre 2020).
[4] *Cf.* site de *Corine Land Cover* https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover (consulté le 29 septembre 2020).
[5] Diverses statistiques de l'INSEE.

#	**Description**	**Références** (non exhaustif)	**Sources**
1, 2.	Population et nombre d'emplois	Danielaini et al. (2017) et J. Gonçalves et al. (2017)	INSEE[1]
3.	% de salles de bain parmi les résidences principales	-	INSEE[1]
4 à 6.	% de chauffage central collectif, individuel et individuel électrique parmi les résidences principales	Cerezo et al. (2017) et RAGE (2012)	INSEE[1]
7.	% de foyers avec une place de parking	-	INSEE[1]
8 à 10.	% de foyers avec une voiture, deux ou plus	M. Bonhomme (2013)	INSEE[1]
11.	Nombre de bâtiments	-	IGN BDTOPO[2]
12, 13.	Hauteur moyenne des bâtiments et nombre d'étages	Adolphe (2002), M. Bonhomme et al. (2012) et Nouvel et al. (2015)	IGN BDTOPO[2]
14.	Volume moyen occupé par les bâtiments présents dans les parcelles	Aksoezen et al. (2015), Nouvel et al. (2015) et RAGE (2012)	IGN BDTOPO et BDPARCELLAIRE[2]
15 à 17.	Moyenne de largeur, de longueur et de facteur de forme des bâtiments	M. Bonhomme et al. (2012) et Caputo et al. (2013)	IGN BDTOPO[2]
18.	Densité de logements par m² de bâti au sol (nombre de logements / CES / surface)	Adam et Moulinié (2005a)	INSEE[1] et IGN BDTOPO[2]
19.	Densité de population par m² de bâti au sol (population / CES / surface)	Danielaini et al. (2017) et J. Gonçalves et al. (2017)	INSEE[1] et IGN BDTOPO[2]
20, 21.	Densité d'emplois par m² de bâti au sol et par m² de locaux professionnels	-	INSEE[1] et IGN BDTOPO[2]
22, 23.	Densité d'emplois par m² de locaux de service ou d'industrie	-	Fichiers MAJIC[3] et IGN BDTOPO[2]
24, 25.	Densité de m² de locaux de service ou d'industrie par m² de sol bâti	-	Fichiers MAJIC[3] et IGN BDTOPO[2]
26 à 35.	Proportion de bâtiments construits avant 1915, entre 1915 et 1948, 1949 et 1967, 1968 et 1974, 1975 et 1981, 1982 et 1989, 1990 et 2000, 2001 et 2005, 2006 et 2012, après 2012	Mata et al. (2014) et Mutani et al. (2016)	Fichiers MAJIC[3], IGN BDTOPO[2] et INSEE[1]

Tableau 2.4 – Paramètres collectés et utilisés pour caractériser les bâtiments

[1] Diverses statistiques de l'INSEE.
[2] Cartes et données géographiques officielles de l'IGN.
[3] Fichiers fonciers du ministère de l'Économie et des Finances.

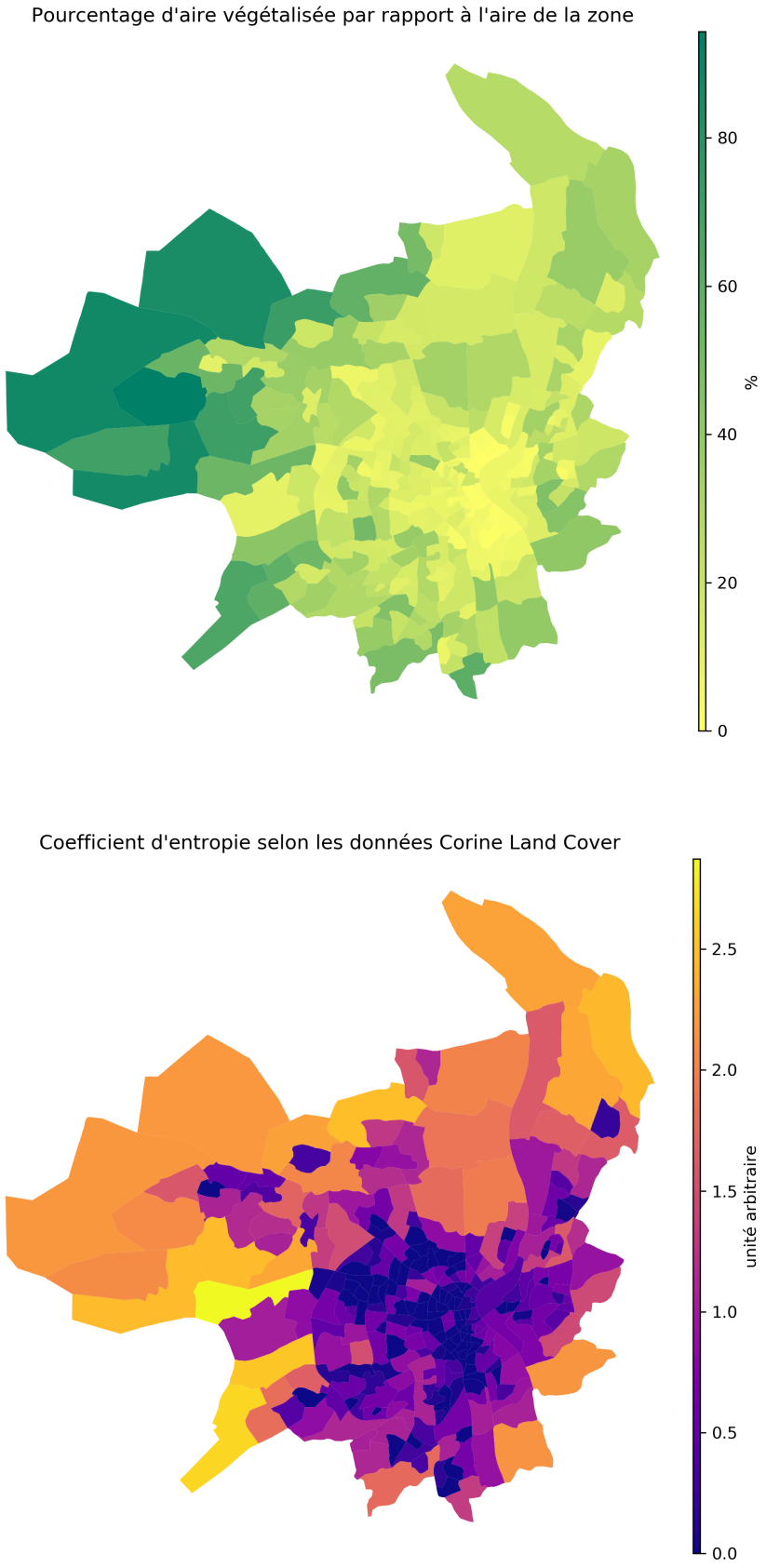


FIGURE 2.25 – Cartes de certains paramètres utilisés pour la caractérisation des formes urbaines et des bâtiments (1). L'entropie correspond à un facteur d'hétérogénéité d'occupation des sols (plus la valeur est élevée, plus les modes d'usage des sols sont variés). On pourra se référer à la section III.1.d du présent chapitre, p. 131, pour plus d'informations.

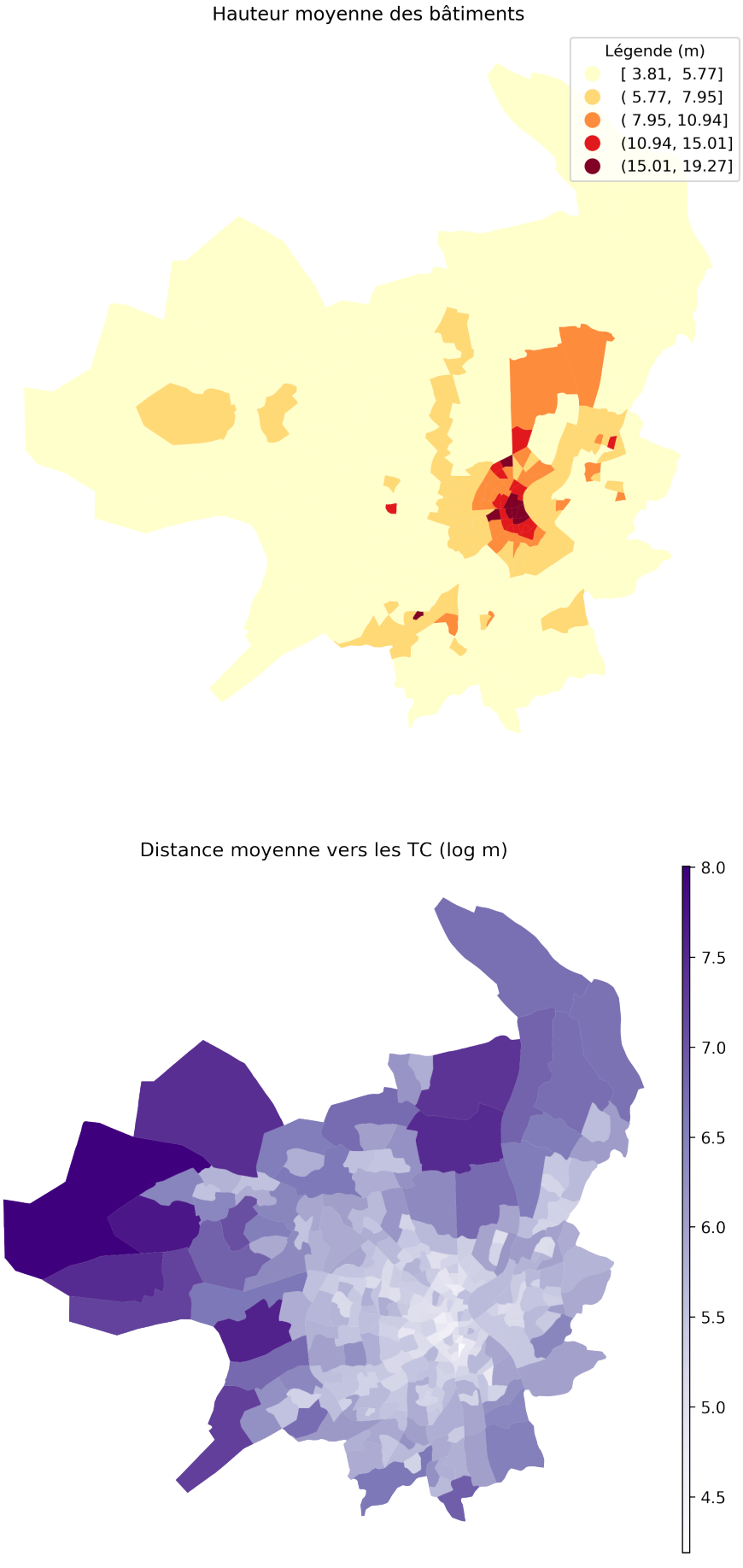


FIGURE 2.25 – Cartes de certains paramètres utilisés pour la caractérisation des formes urbaines et des bâtiments (2).

IV. Les résultats de l'approche quantitative appliquée à Bordeaux Métropole

Cette section présente les résultats de la méthodologie exposée précédemment [98] et de la sélection de paramètres sur la métropole de Bordeaux [99]. Après l'étude de quelques corrélations pour les formes urbaines et les bâtiments (voir sous-section IV.1), nous analyserons les résultats des Analyses en Composantes Principales (voir sous-section IV.2) et enfin ceux de la construction d'archétypes de formes urbaines et de bâtiments (voir sous-section IV.3).

IV.1. Quelques corrélations notables fournies par l'étude des paramètres

L'objectif de cette section est de souligner les traits de l'urbanisme de la métropole bordelaise qui se dégagent de l'analyse des paramètres rassemblés. Nous traiterons séparément les formes urbaines et les bâtiments, utilisant pour cela les caractéristiques quantitatives présentées à la section précédente (voir tableaux 2.3 et 2.4).

IV.1.a. Sur les formes urbaines

Trois aspects nous semblent particulièrement pertinents sur la caractérisation des formes urbaines : le *coefficient d'emprise au sol*, en ce qu'il capture à la fois la densité de bâti sans mécaniquement conduire au niveau de population ; la question des *routes*, car cet indicateur est peu utilisé mais témoigne également de formes urbains distinctes ; la *porosité* enfin, comme indicateur transverse qui recoupe plusieurs problématiques auxquelles l'urbaniste doit répondre par la forme qu'il ou qu'elle conçoit.

Autour du coefficient d'emprise au sol

La première caractéristique intéressante est la répartition des sols entre les différents usages : *route*, *bâti* et *végétation*. On observe assez logiquement une corrélation importante entre une forte emprise du bâti au sol accessible par le coefficient d'emprise au sol (ou *CES*) et le pourcentage de surface de route comme l'illustre la figure 2.26. La relation n'est pas linéaire mais une simple régression linéaire donne tout de même un coefficient R^2 de 0,51. On peut remarquer deux parties dans le nuage de points : la première où les quartiers sont similaires avec des coefficients d'emprise au sol faible ($\leq$ 0,2) et des proportions de route croissant linéairement selon une pente d'environ 0,5 ; une deuxième partie ensuite, de quartiers plus proches du centre de la métropole et de taille relativement uniforme et qui augmentent cette fois-ci avec une pente moins importante d'environ 0,15. Ces IRIS sont beaucoup plus dispersés autour de la droite moyenne. Cela témoigne

98. Voir section précédente II.
99. Voir section précédente III.

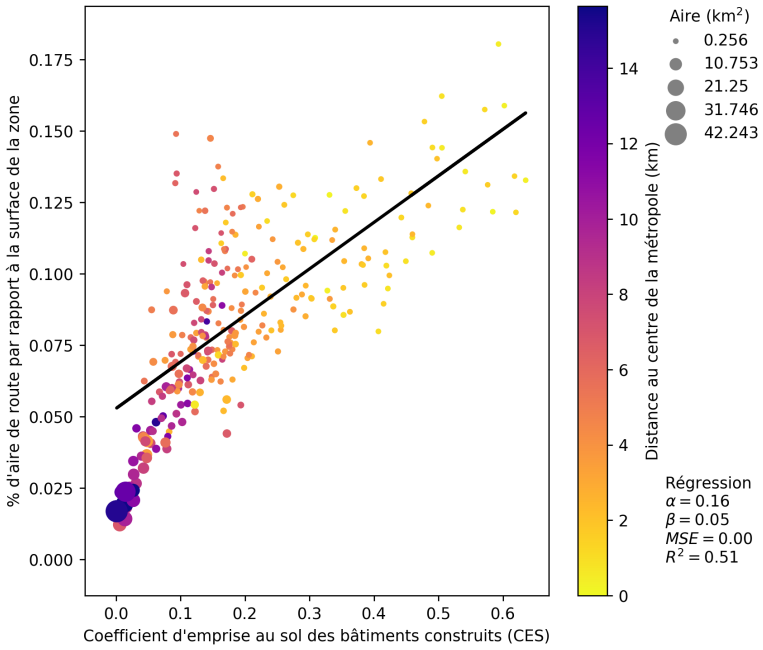


FIGURE 2.26 – Corrélation entre le coefficient d'emprise au sol et le pourcentage de surface occupé par de la route.

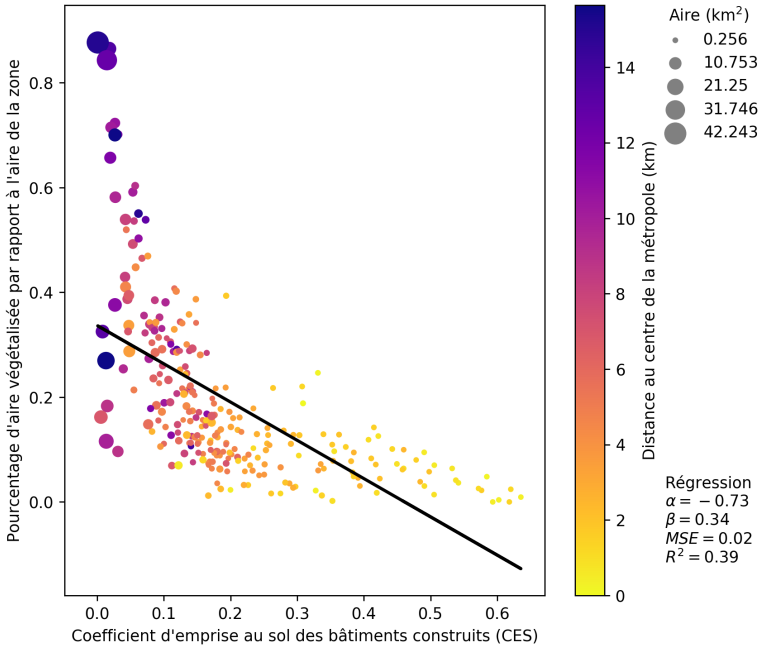


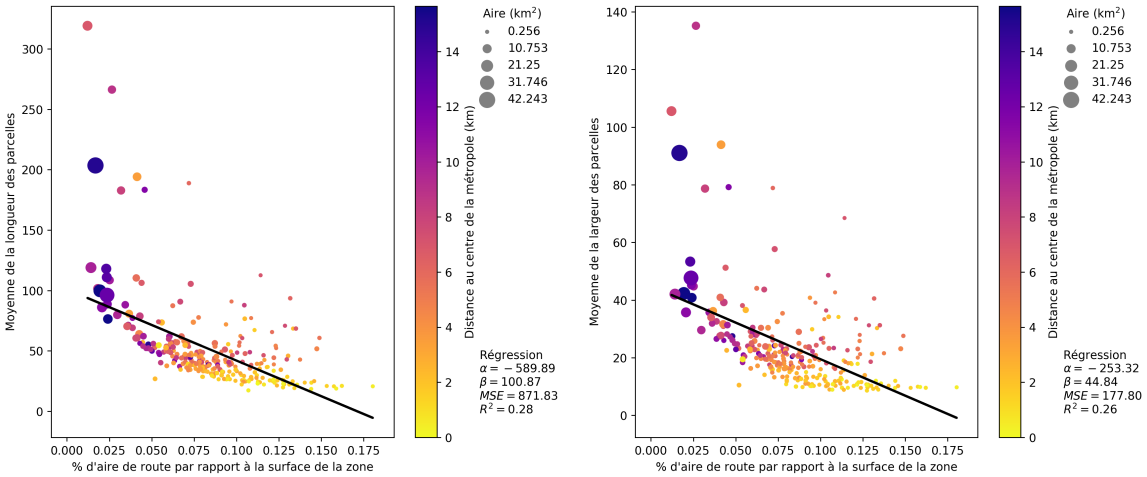
FIGURE 2.27 – Corrélation entre le coefficient d'emprise au sol et le pourcentage de surface occupé par des espaces répertoriés comme verts.

que, lorsque le sol est fortement bâti, comme par exemple dans le centre-ville ou les zones très denses, il y a proportionnellement beaucoup de routes mais dans des formes variées, confirmant la diversité des visages de l'urbain et du périurbain. Les quartiers historiques présentent une surface principalement répartie entre routes et bâtiments, contrastant avec les banlieues et les zones périurbaines dans lesquelles le terrain est moins bâti et plus occupé par des jardins ou de larges zones non artificialisées, et enfin avec les espaces ruraux, peu utilisés par bâti et routes.

Le même genre de corrélation affiché par la figure 2.27 confirme cette relation mais avec une pente négative entre le CES et le pourcentage d'aire végétalisée. La relation semble encore moins linéaire, comme en témoigne le R^2 qui n'est qu'à 0,39, mais il y a très clairement un lien entre un coefficient d'emprise au sol élevé ($\geq$ 25 %) qui conduit à des pourcentages de surface végétalisée inférieurs à 20 % et au contraire, lorsque le CES est faible ($\leq$ 10 %) à des espaces naturels prenant entre 10 et 90 % de la surface. De nouveau, on distingue une superposition de deux tendances, encore plus marquées que dans la relation précédente, l'une pour les espaces faiblement bâtis et l'autre pour les espaces à plus fort CES : on retrouve bien une démarcation continue entre rural et urbain, avec une plus grande variété des quartiers périurbains (moyennement distants du cœur de la métropole).

Il est toujours pertinent de tenter de comprendre les relations de causalité éventuelles se dissimulant derrière des corrélations [100]. Le besoin d'habitations a conduit à construire des bâtiments les uns à côté des autres, remplaçant les espaces naturels par du bâti ; l'accès à ces logements a nécessité de nombreuses routes desservant l'ensemble des constructions.

Autour des routes

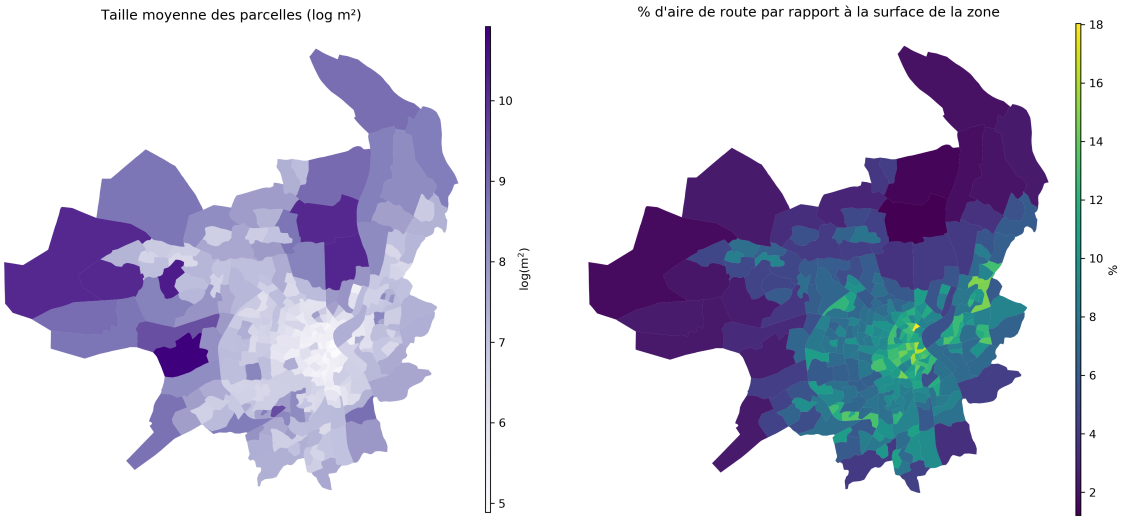


(A) (B)

FIGURE 2.28 – Corrélation entre le pourcentage de surface occupé par de la route et la taille des parcelles (largeur et longueur).

La proportion de surface utilisée par les routes s'avère fortement corrélée avec la taille des parcelles (*cf.* figure 2.28) : plus les parcelles sont larges et longues et moins il y a de routes proportionnellement. Cela semble également cohérent puisque les routes ne passent que le long des parcelles et que l'on retrouve des larges parcelles dans les zones plutôt rurales tandis que les centres villes sont composées de parcelles de plus petites tailles (sans jardin, remplies par les bâtiments). On peut vérifier cette logique en regardant les deux cartes correspondantes affichées sur la figure 2.29. Quelques IRIS ont une forme particulière avec des moyennes de longueur ou de largeur plus importantes que la logique des deux

100. ATTALI (2015) expose d'ailleurs que nous sommes trop souvent à la recherche de simples corrélations quand les relations de causalité sont plus importantes dans une démarche de compréhension [ATTALI (2015)].



(A) (B)

FIGURE 2.29 – Cartes des tailles de parcelles (en ln m^2) et du pourcentage de surface occupée par des routes dans la métropole de Bordeaux.

nuages de points : ces IRIS correspondent probablement à des formes urbaines de villes ou de villages périphériques relativement bien desservies mais présentant des parcelles plus grandes (parce que disposant de jardins par exemple ?) ; des zones d'activités, avec des parcelles étendues et un réseau routier développé peuvent en être d'autres exemples.

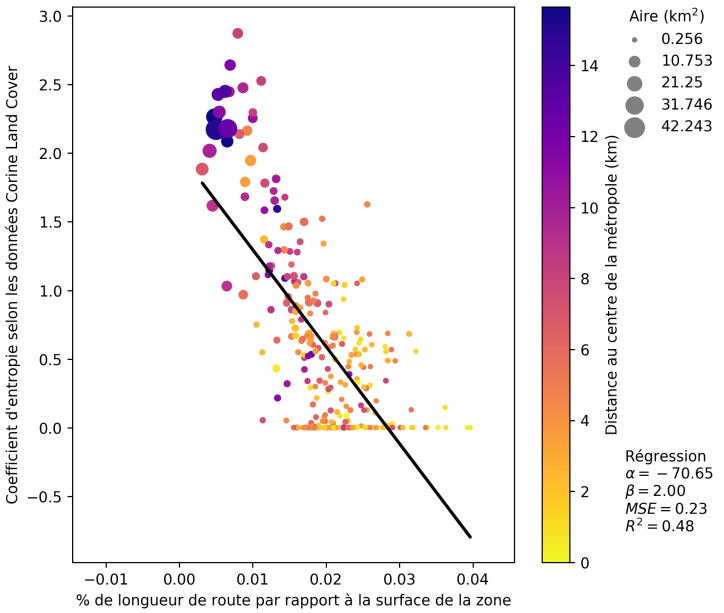


FIGURE 2.30 – Corrélation entre le ratio *longueur de route* sur *surface totale* et le coefficient d'entropie calculé à partir des données *Corine Land Cover*.

En étudiant le ratio *longueur de route* (en m) sur *surface totale* (en m^2) (*cf.* figure 2.30), on s'aperçoit qu'il est également corrélé à l'entropie, c'est-à-dire à la variété de terrains différents du quartier. Lorsqu'il y a proportionnellement peu de routes, la diversité d'usage des sols est plus grande tandis que les quartiers avec une forte

proportion de routes sont plus homogènes. On retrouve en cela le fait que les quartiers très denses présentent souvent quelques formes urbaines similaires (beaucoup de terrain bâti pour peu d'autres usages d'après la nomenclature de Corine Land Cover [101]) tandis que les zones périurbaines ou rurales sont bien plus variées dans leurs déclinaisons (cultures, zones d'activités, lotissements, forêts, etc.).

La proportion de surface occupée par des routes et la longueur de celles-ci renseignent donc sur la taille des parcelles. Certains quartiers ont besoin d'être fortement « irrigués en routes » afin de permettre un accès équitable et global aux bâtiments tandis que les zones moins habitées ou présentant moins de locaux d'activités (les forêts, les zones agricoles, etc.) ou organisées différemment (lotissements) peuvent avoir un réseau plus sommaire. On retrouve, sous-jacente, la notion de porosité ou de perméabilité discutée précédemment (*cf.* section III.3) et dont nous allons détailler quelques éléments ci-après.

La mesure de la porosité comme indicateur transverse

Parmi les éléments décrits dans la section III.3, nous retiendrons trois indicateurs pour qualifier la porosité : la *distance moyenne aux stations de transport en commun*, la *taille des îlots* [102] et la *proportion de surface couverte par des routes*.

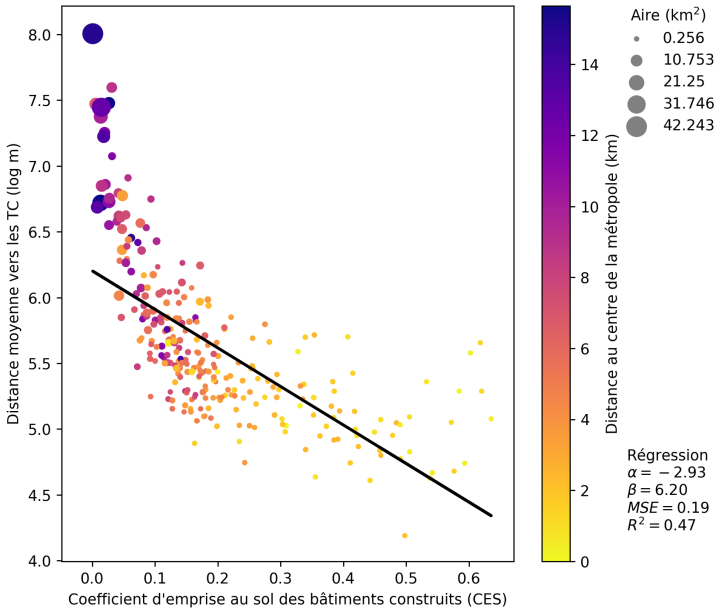


FIGURE 2.31 – Corrélation entre le coefficient d'emprise au sol et la distance moyenne à un arrêt de transport en commun (bus et tram).

La figure 2.31 affiche ainsi la corrélation entre le coefficient d'emprise au sol et

101. Les différents usages des sols possibles au sein des données du projet Corine Land Cover de Copernicus sont affichés dans la figure 2.9, p. 115. On pourra se référer à la documentation du projet Corine Land Cover pour plus de détails, accessible sur https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/html/ pour la version 2012 des couches (consultée le 7 décembre 2020).

102. À ne pas confondre avec la taille des parcelles, les îlots étant les ensembles connexes de bâtiments, ils peuvent donc rassembler plusieurs parcelles. Les deux notions sont corrélées : sur la métropole de Bordeaux, lors de tentative de régression linéaire, le coefficient de détermination R^2 entre le log de la taille moyenne des parcelles et le log de taille moyenne des îlots est de 0,51.

la distance moyenne à un arrêt du réseau bordelais. Les transports en commun desservent les zones les plus densément peuplées et donc les plus densément bâties. Cet effet est combiné à la perméabilité des formes urbaines, qui rend compte de la facilité ou non à traverser les îlots. La présence d'arrêts et leur facilité d'accès sont les deux principaux facteurs expliquant une faible valeur du paramètre de *distance moyenne aux arrêts*.

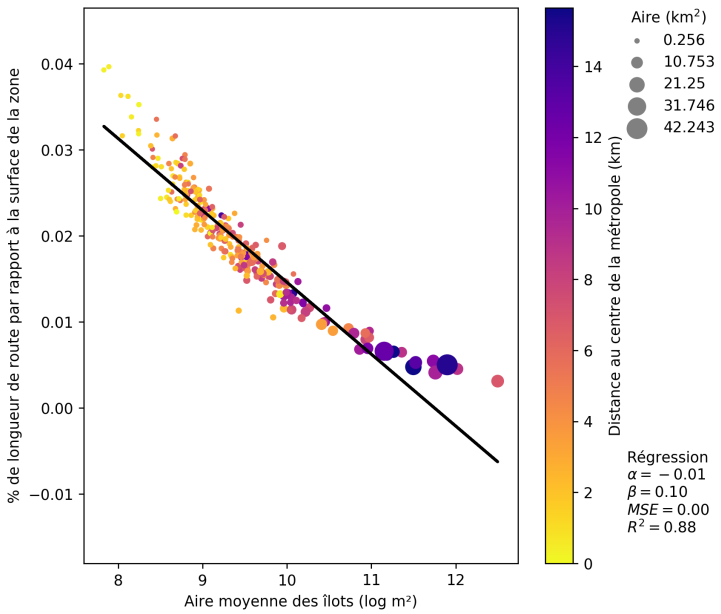


FIGURE 2.32 – Corrélation entre le coefficient d'emprise au sol et la distance moyenne à un arrêt de transport en commun (bus et tram).

Un autre paramètre intéressant pour la mesure de la porosité est la taille moyenne des îlots de bâtiments dans la ville. Plus l'îlot sera petit et plus la possibilité de se déplacer sera grande. Cette donnée est fortement corrélée avec la proportion de routes sur l'îlot comme le souligne la figure 2.32. On peut constater que la relation n'est une fois de plus pas linéaire, comme c'était le cas pour la figure précédente 2.31 : la relation est plus proche d'une décroissance exponentielle (en particulier en considérant que l'une ou l'autre des grandeurs a déjà été passée au log). La première piste d'explication qui pourrait être apportée est que le rapport entre une longueur et une aire étant le passage au carré, l'augmentation d'une longueur l correspondant en fait à un détour autour d'une aire supplémentaire de $l^2/4$. On peut également noter que nombre de quartiers se trouvent souvent au milieu du nuage de points, n'étant ni très large, ni très petit, ayant une proportion de routes moyenne, un CES relativement faible : ces IRIS peuvent être ceux du « périurbain » de la métropole qui sont en grand nombre. Enfin, contrairement aux nuages de points étudiés précédemment, on constate une très faible dispersion autour de la loi moyenne d'évolution, impliquant que la relation entre les deux grandeurs ne subit que peu d'exceptions.

Synthèse

Que nous disent toutes ces corrélations sur le territoire, que nous disent ces données dans notre caractérisation des formes urbaines ? Tout d'abord, il apparaît grossièrement trois groupes d'IRIS : les quartiers à petites parcelles, petits îlots,

sillonnés de nombreuses routes, accessibles par les transports en commun ; à l'autre extrémité, on trouve des quartiers de grandes parcelles et de grands îlots, marqués par une faible emprise des bâtiments, largement végétalisés, avec une surface faible occupée par les routes, plutôt abandonnés par les bus et tramways ; et entre ces deux extrêmes se trouvent un grand nombre de quartiers qui couvrent le large spectre de valeurs. Il est possible d'y voir l'expression du centre-ville, des milieux ruraux et enfin du périurbain (riche en visages distincts comme précisé précédemment).

IV.1.b. Sur les bâtiments

Nous procédons de même sur les bâtiments, en nous concentrant cette fois sur les *méthodes de chauffage*, la *présence ou non de garage*, la *possession de voiture* et la *hauteur des bâtiments*.

Le chauffage collectif

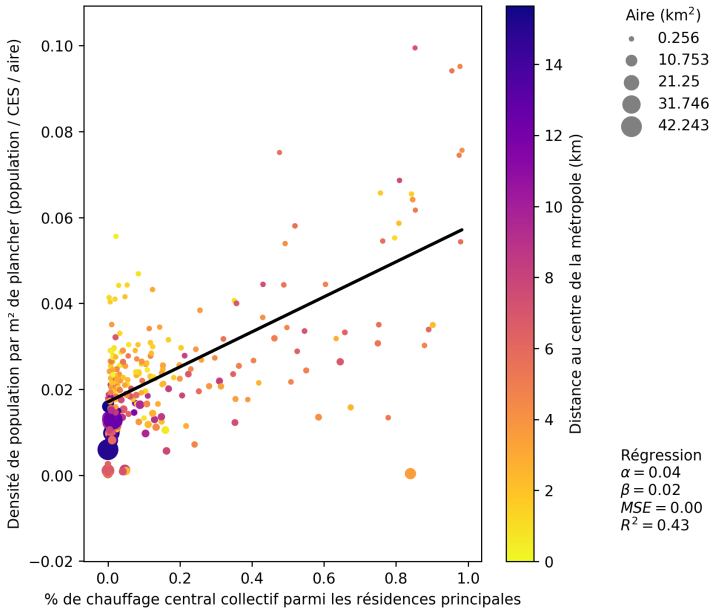


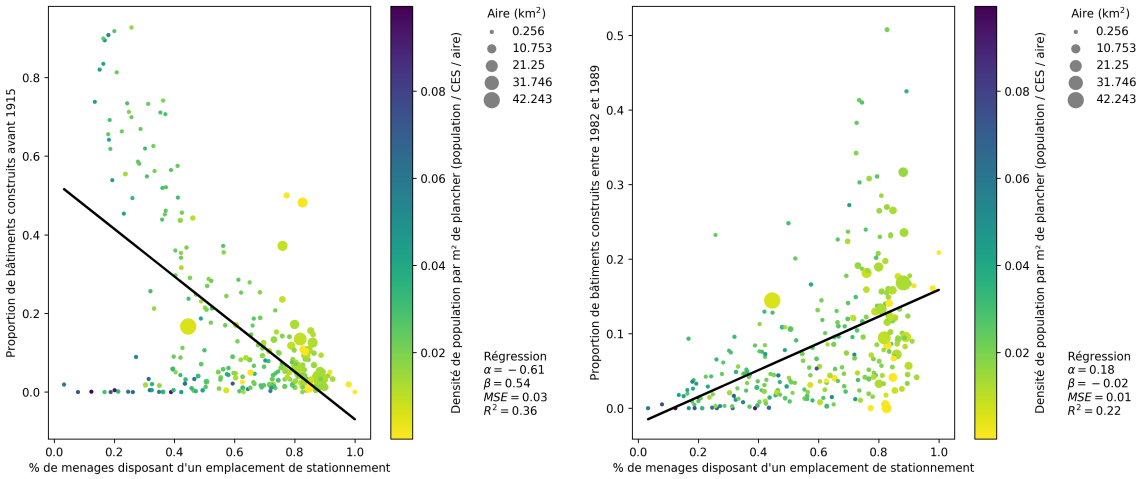
FIGURE 2.33 – Corrélation entre la proportion de chauffage collectif dans les résidences principales et la densité de population.

La figure 2.33 trace la densité de population par m² de sol bâti en fonction de la proportion de bâtiments équipés de chauffage collectif. La corrélation linéaire n'est pas très marquée (R^2 de 0,43) mais la tendance semble tout de même à ce qu'une forte densité de population soit liée à proportionnellement plus de chauffage collectif. En calculant la densité de population par rapport à l'emprise des bâtiments au sol, on accède en fait de façon détournée à la hauteur d'un bâtiment. Assez logiquement, une augmentation de la densité donc de la hauteur des bâtiments signifie qu'on a plutôt affaire à des immeubles de taille importante et donc à une plus grande probabilité d'avoir des systèmes de chauffage collectif que dans des habitations plus modestes.

On peut remarquer dans ce nuage de points deux éléments. Tout d'abord, il y a très peu de fortes densités sans chauffage collectif à l'exception notable de

l'un d'entre eux qui présente ainsi une forte proportion de chauffage collectif mais une très faible densité de population. On peut remarquer en outre que la grande majorité des IRIS ne dispose que peu de chauffage collectif (ils sont une quarantaine à avoir plus de 40 % de chauffage central collectif). Les IRIS sous la courbes sont plutôt larges (en superficie) ; à l'inverse, les IRIS au-dessus de la courbe pour les mêmes proportions de chauffage collectif sont légèrement plus réduits et plus proches du centre de la métropole. On note enfin que la plupart des IRIS ayant de fortes proportions de systèmes de chauffage collectif sont situés à une distance moyenne du centre de la métropole, ni très proches (les bâtiments de ces IRIS ayant plutôt moins de 20 %), ni très éloignés (de même, les bâtiments des larges IRIS du pourtour ont moins de 20 % de chauffage collectif).

La présence ou non de garage



(A) (B)

FIGURE 2.34 – Corrélations entre la présence de garage et la répartition de la date de construction des bâtiments pour deux périodes : avant 1915 (gauche) et entre 1982 et 1989 (droite).

Un facteur caractéristique du développement des villes au siècle dernier provient de l'organisation et du développement autour de l'usage de la voiture [FRESSOZ (2014)]. La présence de garage ou de place de stationnement pour un logement est donc un paramètre non trivial qu'il est intéressant d'étudier. Ainsi, la figure 2.34 souligne que l'âge des bâtiments et les places de stationnement sont liées : quand il y a principalement des constructions antérieures à 1915, peu de foyers disposent d'une place de stationnement, tandis qu'une forte proportion de bâtiments datant de la période 1982 à 1989 est corrélée à la possession d'une place de stationnement, attestant de l'évolution des logiques de planification.

On peut remarquer en outre plusieurs faits notables.

– Tout d'abord, la plupart des quartiers très denses ont peu d'emplacement de stationnement (visible sur les deux nuages de points de la figure 2.34). Cela peut s'expliquer par le fait qu'il est difficile, dans des habitations très denses (tours, larges immeubles), de fournir une place de parking à chaque habitant et les règles d'urbanisme sur le ratio *place de stationnement par habitant* sont généralement différentes pour les grandes verticalités ou les quartiers historiques.

– Le nuage de la figure 2.34a peut être décomposé selon deux tendances : l'une suivant une pente négative, l'autre plutôt horizontale et indépendante de la proportion de bâtiments construits avant 1915. Quand on étudie en outre le même nuage de points dont la couleur varie en fonction de la proximité au centre de la métropole, on constate que les quartiers denses ayant peu de places sont situés dans le périurbain, les points du deuxième quadrant (en haut à gauche) correspondant au centre historique.
– Ensuite, on remarque que ces quartiers très distincts au regard de la présence ou non de bâtiments anciens (avant 1915) sont confondus dans la figure 2.34b. Celle-ci présente un aspect très intéressant avec l'existence d'un effet de seuil : il est rare d'avoir une forte proportion de bâtiments datant des années 80 et n'ayant pas de place de stationnement. Le fait qu'il y a très peu d'IRIS qui se situent au-dessus de la droite identité indique que la plupart des bâtiments construits à cette époque là avaient une place pour garer une voiture. Si l'on revient à la figure 2.34a, on peut constater que cet effet de seuil est également présent mais à l'inverse : seuls quelques IRIS ont une proportion importante de bâtiments anciens construits avant 1915 et en même temps beaucoup de places de stationnement. Ces IRIS correspondent, vu leur taille, leur densité et l'éloignement du centre de la métropole, probablement à des IRIS plus ruraux.

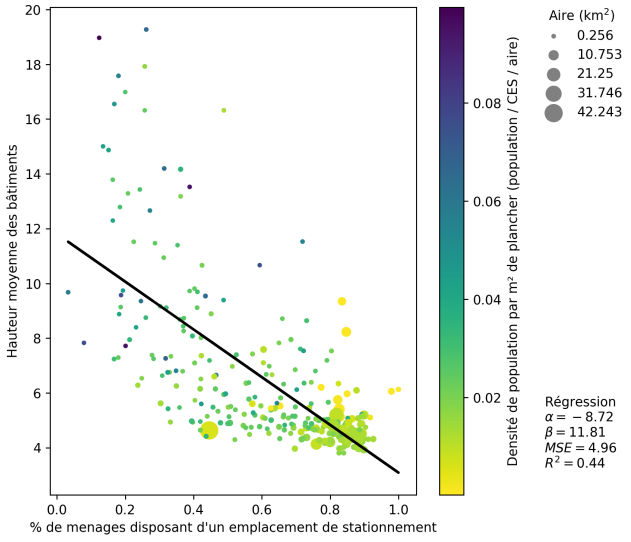


FIGURE 2.35 – Corrélation entre la hauteur des bâtiments et la présence de garage.

Une autre relation dont la corrélation linéaire est assez marquée associe la hauteur des bâtiments et la présence de stationnement (voir figure 2.35). Plus les bâtiments sont hauts et moins les gens ont de place de parking généralement. Cela corrobore l'explication faite plus haut : les habitations dans des lotissements possèdent logiquement toutes une place tandis que les logements dans les immeubles en ont moins souvent.

La possession de voiture

La possession de voitures est matérialisée par trois indicateurs dans les rapports de l'INSEE sur la population : le foyer a-t-il une voiture, le foyer a-t-il une voiture ou plus, le foyer a-t-il deux voitures ou plus ? Le fait d'avoir plus ou moins de voitures est un indicateur que l'on lie régulièrement à la séparation rural-urbain, les

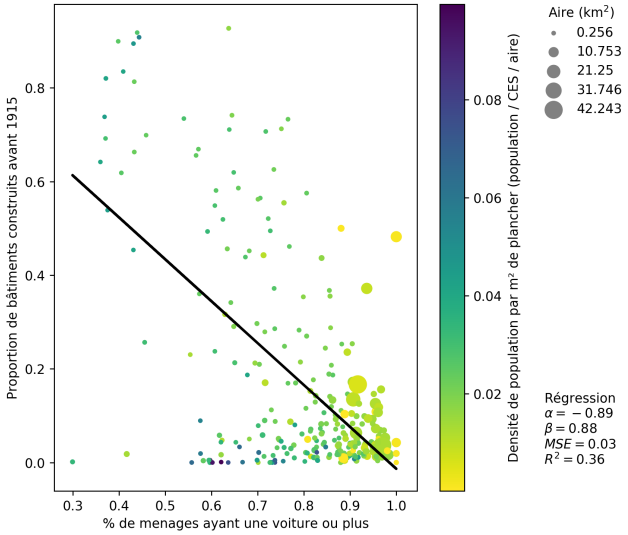


FIGURE 2.36 – Corrélation entre l'utilisation de voitures et la proportion d'anciens bâtiments.

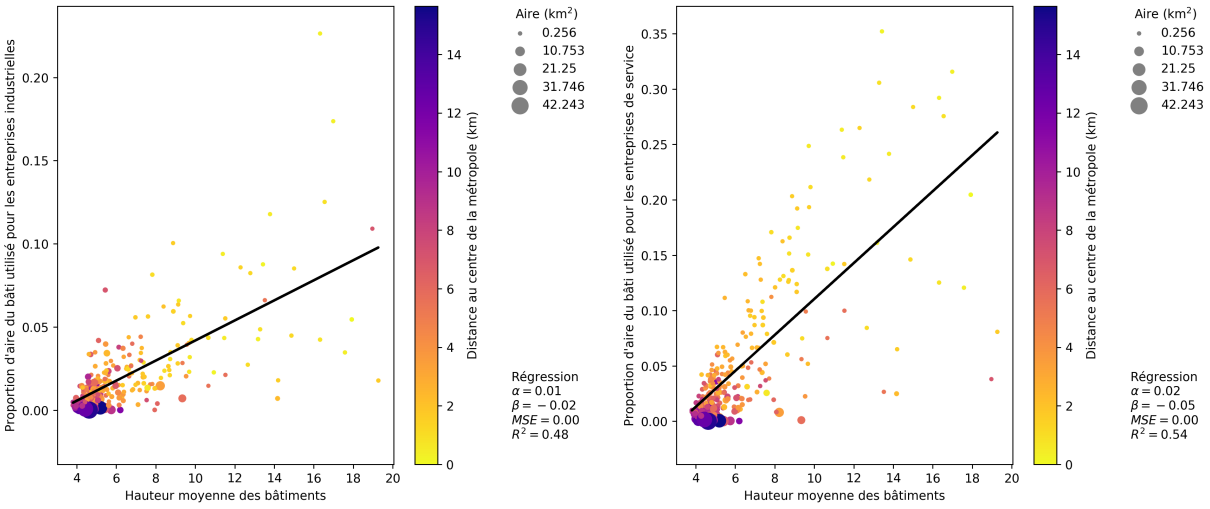
habitants des milieux ruraux ayant en moyenne plus de voitures que les habitants des milieux urbains. On peut vérifier en tout cas qu'il existe une corrélation entre la présence d'anciens bâtiments (surtout situés dans le centre de Bordeaux) et le fait de ne pas avoir « beaucoup » de voitures, comme visible sur la figure 2.36. On note des effets similaires à ceux constatés sur les places de stationnement : les quartiers denses qui disposent peu de voitures sont concentrés dans une portion similaire de la courbe d'une part ; d'autre part, il y a également un effet de seuil avec une forme de limite, les quartiers où les ménages ont proportionnellement plus de voitures ont moins de bâtiments anciens. Cet effet est toutefois moins marqué que pour les garages ou les places de stationnement, illustrant une différence entre les comportements individuels (posséder ou non une voiture) et les infrastructures physiques (place de stationnement).

La hauteur des bâtiments

On constate, en étudiant les deux figures 2.37a et 2.37b, que la hauteur moyenne des bâtiments est également corrélée à la proportion d'aire utilisée par des entreprises d'industrie et de services. À chaque augmentation de 2 m de la hauteur est associée en moyenne une hausse de 3 % des surfaces occupées par des locaux professionnels de ces catégories. Les IRIS concernés sont souvent proches du cœur de la métropole et avec des aires relativement faibles comparées au reste des IRIS. La tendance est marquée mais la dispersion est importante, formant un cône ayant pour base les IRIS avec des bâtiments de deux étages (ceux entre 5 et 6 m) et s'élargissant de plus en plus avec la croissance de la hauteur moyenne.

Synthèse

Parmi les paramètres que nous avons mentionnés précédemment, l'âge des bâtiments est un facteur illustrant différentes façons de construire, avec ou sans garage. Le pourcentage de ménages possédant une voiture ou plus va ainsi en diminuant avec le pourcentage de bâtiments plus anciens que 1915 (augmenter de 10 % la proportion de bâtiments construits avant 1915 conduit environ en moyenne



(A) Locaux de la branche *industrie*

(B) Locaux de la branche *service*

FIGURE 2.37 – Corrélations entre la hauteur moyenne des bâtiments et la proportion de surface occupée par des locaux d'activités.

à une baisse de 11,2 % de la proportion de ménages ayant une voiture ou plus). La hauteur est également une variable pertinente pour accéder à la proportion de surface utilisée par des locaux professionnels, plus les IRIS abritent des bâtiments hauts en moyenne, plus cette proportion a des chances d'être élevée. Ces deux propositions peuvent d'ailleurs être reliées par le fait que la hauteur et la possession de place de stationnement sont négativement corrélées (augmenter la hauteur moyenne d'un mètre peut, en moyenne, diminuer la proportion de ménages disposant d'un emplacement de parking de 11,5 %).

En somme, ces corrélations séparent les bâtiments tout d'abord selon la hauteur, confirmant l'image commune d'une opposition entre tours et maisons individuelles. Pour autant, nous avons vu que les nuages de points étaient souvent très éclatés avec des dispersions importantes par rapport aux formes urbaines, indiquant potentiellement une plus grande variabilité des profils de bâtiments.

IV.2. Les résultats des Analyses en Composantes Principales

L'analyse en composantes principales recombine linéairement les axes (*i.e.* les paramètres) des données pour construire de nouveaux axes qui maximisent la variance sur l'axe. Chaque nouvel axe porte une partie de la variance globale des points (accessible via les valeurs propres de la matrice de covariance calculée par l'algorithme – les vecteurs propres correspondant aux nouveaux axes). Il est donc d'usage de regarder la variance portée par chacun des axes pour évaluer combien d'axes sont nécessaires à l'analyse et pourraient suffire à ce que notre espace de reprojection contienne une part suffisante de l'information. Ce genre de graphique est généralement appelé *scree plot* (littéralement *tracé éboulis*) en ce qu'il ressemble au profil d'éboulis avec une pente importante puis une forme de tassage des points sur le bas de la courbe (voir figure 2.38). Deux ACP ont été réalisées, l'une portant sur les paramètres relatifs aux formes urbaines, l'autre

sur ceux caractérisant les bâtiments.

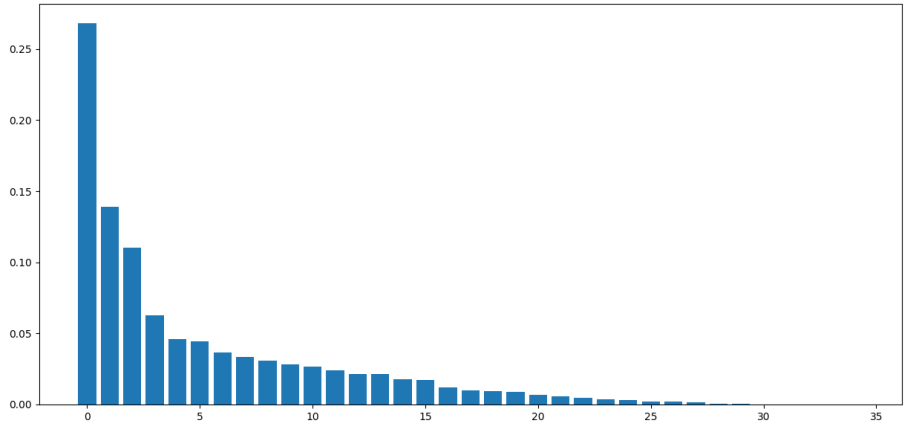


FIGURE 2.38 – Variance expliquée par les différents axes de l'ACP pour les bâtiments (en ratio de variance).

Nous avons placé les détails de l'analyse des axes principaux identifiés par les ACP, appliquées séparément aux paramètres de formes urbaines et de bâtiments, dans l'annexe D (p. 393) pour ne pas surcharger le présent document. Nous n'en livrons ici que les principales conclusions.

Tout d'abord, on remarque que les *formes urbaines* sont facilement séparables entre zones *denses de centres-villes* et *milieux ruraux*, le premier axe de l'ACP portant 50 % de la variance. La constitution de cet axe confirme les conclusions de l'étude des corrélations effectuées ci-dessus sur cette distinction notoire entre urbain et rural. Le deuxième axe est plus difficile à interpréter et raffine la description de l'urbain en opposant des formes denses plutôt éloignées de la ville de Bordeaux, mal desservies par les transports en commun, avec des quartiers plus accessibles mais présentant de larges parcelles (ceux-ci peuvent correspondre à deux formes de périurbains, entre zones d'activités et quartiers résidentiels par exemple).

En ce qui concerne les *bâtiments*, il n'existe pas de prime abord de distinction aussi importante statistiquement : les trois premiers axes combinés portent 50 % (contre le premier axe seul dans le cas des *formes urbaines*). Le premier d'entre eux sépare bien les bâtiments de grande taille (hauts, larges, profonds, abritant beaucoup d'entreprises) de ceux plus modestes (mais généralement nombreux, associés à la possession de voitures), confirmant ici aussi les résultats de l'analyse des corrélations réalisée plus haut. Le deuxième axe établit une distinction d'âge entre les formes de taille moyenne telles que les petits immeubles de banlieues proches plutôt récents (après les années 70) et les bâtiments mixtes et anciens (avant 1948) que l'on trouve en centre-ville. Le troisième axe enfin consacre l'utilisation (logement ou locaux professionnels) comme facteur séparateur.

Pour conclure les résultats des deux ACP, les éléments qui ressortent de l'analyse des axes principaux identifiés par les ACP sur les données consolident les remarques faites plus haut sur les relations de corrélation identifiées en retrouvant des séparations similaires. Le réalisme de ces séparations valide la pertinence de l'approche déployée ici de construction d'archétypes pour représentation de la ville.

IV.3. Des archétypes obtenus cohérents : quelques exemples

La dernière étape méthodologique est l'utilisation de techniques de clustering pour le regroupement des IRIS et la création des archétypes. Deux techniques sont employées ici tel que cela a été mentionné plus tôt : celle de l'*agglomerative clustering* et celle des *k-means*. Nous présenterons rapidement les résultats généraux et décrirons deux archétypes de chaque famille, la description exhaustive des archétypes étant disponible dans les annexes E (*formes urbaines*) et F (*bâtiments*).

IV.3.a. De formes urbaines

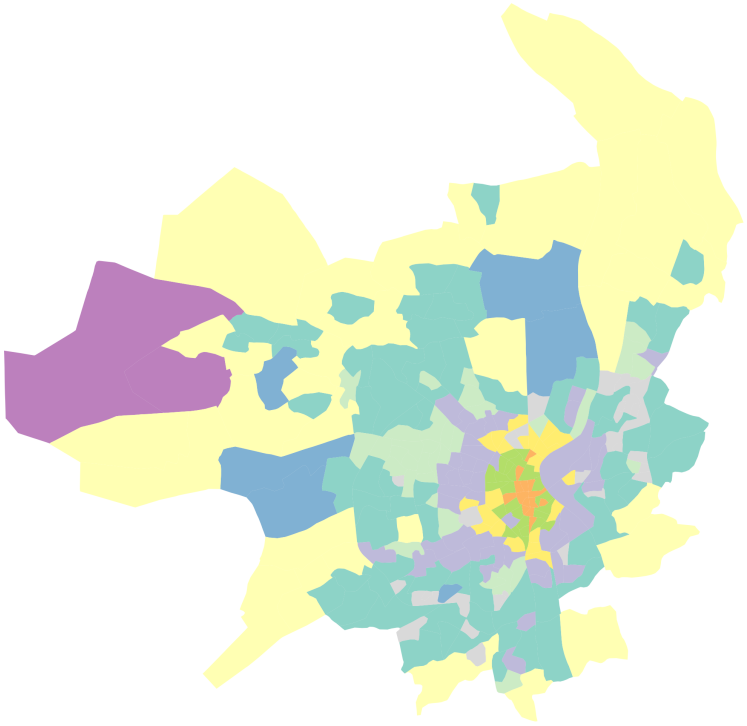


FIGURE 2.39 – Résultats du clustering pour les sols obtenus par l'algorithme agglomératif.

La figure 2.39 présente les résultats de l'*algorithme agglomératif* pour le clustering des IRIS pour les formes urbaines. On aperçoit clairement le motif classique séparant les différentes zones d'une ville : centre historique, périurbain de plusieurs visages, zones plus rurales et zones moins habitées. Il ne semble pas y avoir de différence majeure entre les deux rives mais cela semble logique au vu des données présentées précédemment puisqu'il n'y a pas de paramètre représentant la nature de la végétation ou des activités forestières ou agricoles.

Deux quartiers restent exclus dans toutes les situations, ce sont les deux IRIS occidentaux de Saint-Médard-en-Jalles (en violet à l'extrême ouest sur la carte). Ces IRIS ont des formes très homogènes, de très fortes proportions d'espaces naturels (presque exclusivement avec 91 % de surface couverte par de la végétation et donc peu de bâti) et peu d'accès aux transports en commun.

Le k-means fournit des résultats proches (voir figure 2.40) mais somme toute plus concentriques dans l'organisation des *clusters*. Les quartiers du périurbain

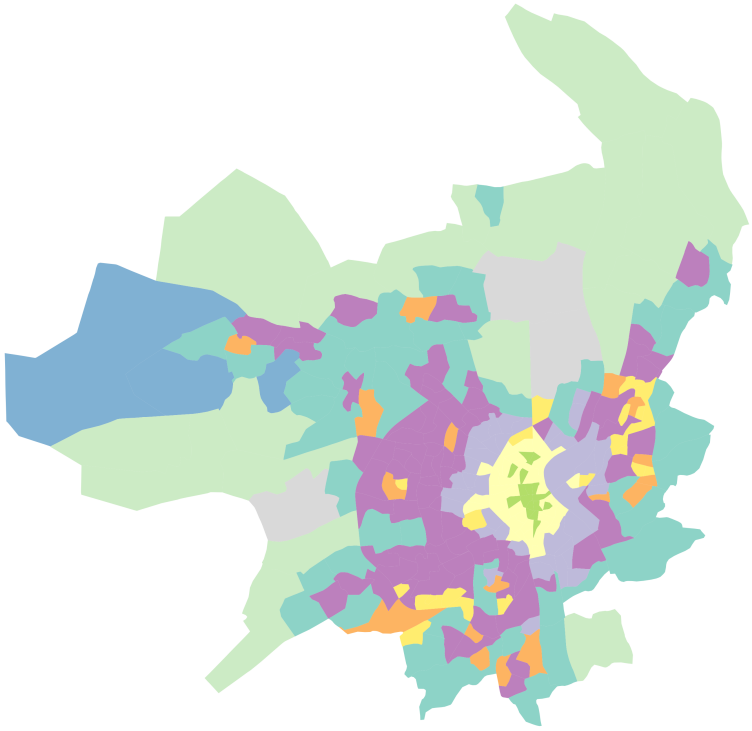


FIGURE 2.40 – Résultats du clustering pour les sols obtenus par l'algorithme du k-means.

ont des profils très similaires conduisant à des regroupements très variables [103].

Les archétypes de formes urbaines utilisés

Les résultats définitifs sélectionnés pour la suite de la modélisation sont représentés dans la figure 2.41. Deux des archétypes, les formes « *Banlieues et petites villes* » et « *Centre historique* », sont détaillés plus loin [104]. Les images suivantes et listes de paramètres résument quelques caractéristiques principales utiles pour la prise en compte de ces archétypes dans la modélisation long-terme.

On pourra remarquer que la répartition entre les différents usages prévus ne couvre jamais l'entièreté de la surface de la forme urbaine (les proportions ne s'additionnent pas jusqu'à 100 %), conséquence attendue de l'utilisation de la moyenne ou de la médiane pour le calcul de proportions sur un ensemble d'individus (ici les IRIS). L'insertion d'un sol réservé à « d'autres usages » permet d'intégrer ce reste de surface *a priori* non utilisée par nos archétypes mais qui correspond en partie à une variance statistique.

103. En effet, l'algorithme du *k-means* dépend fortement de l'initialisation des noyaux des *clusters*. Nous avons appliqué ces algorithmes avec `scikit-learn` qui intègre la possibilité de répéter cette initialisation et de prendre le meilleur résultat en terme d'inertie des groupes, *cf.* https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html (consultée le 29 septembre 2020).

104. Voir l'annexe E, p. 401, pour le détail de l'ensemble des archétypes inclus dans le modèle.

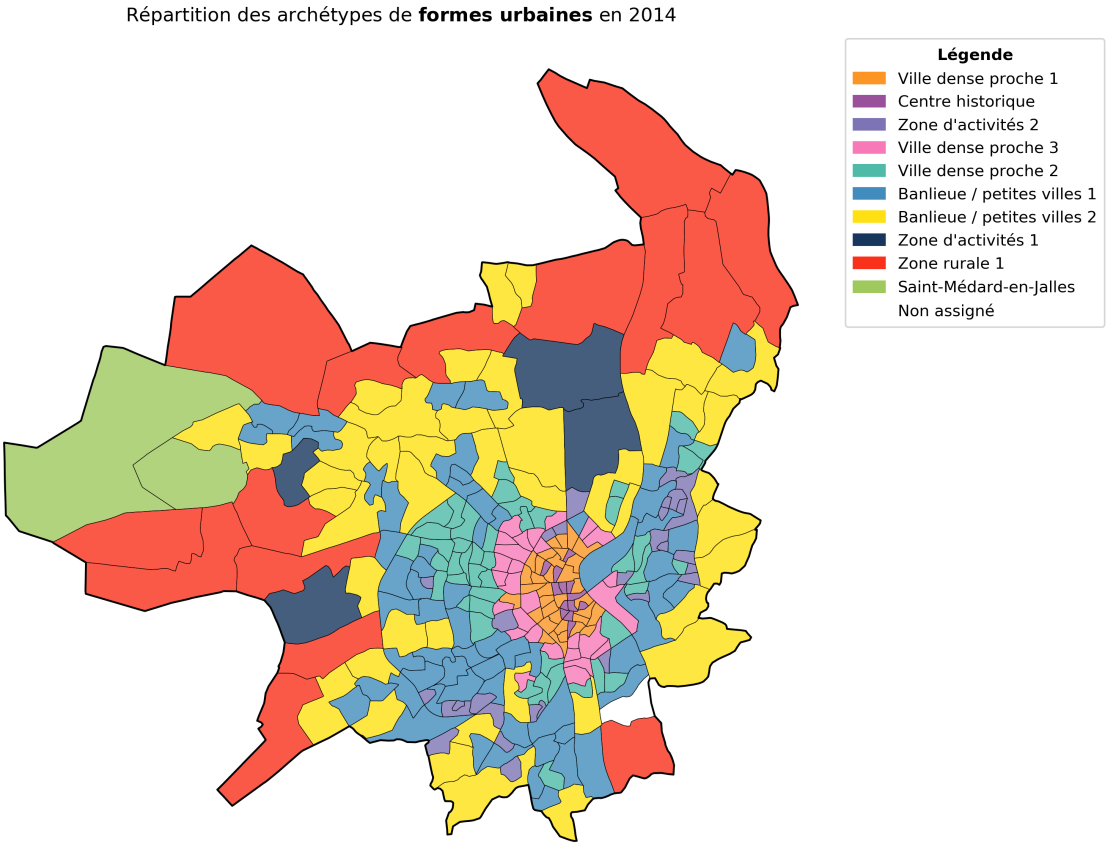


FIGURE 2.41 – Résultats définitifs des archétypes de formes urbaines obtenus par l'algorithme du k-means..

Banlieues et petites villes

Répartition de la **forme urbaine** *Banlieue / petites villes* 1 en 2014

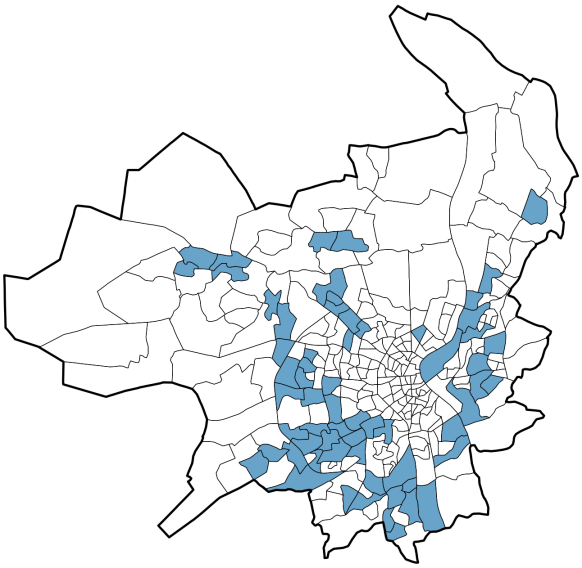


FIGURE 2.42 – Carte des IRIS de l'archétype « *Banlieues et petites villes* » en 2014.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	13,6717	13,6978	3,1977
Écoles (%)	0,1905	0,1449	0,2253
Végétation (%)	21,0956	20,8688	9,8638
Parkings (%)	0,9743	0,4627	1,1379
Autoroutes (%)	0,6559	0,0000	1,1203
Nationales (%)	0,2004	0,0000	0,4035
Départementales (%)	0,8127	0,7888	0,6126
Autres routes (%)	6,4320	6,3374	1,2522

TABLEAU 2.5 – Tableau présentant les caractéristiques de l'archétype « *Banlieues et petites villes* ».

L'archétype décrit ici représente une part importante des quartiers de la métropole bordelaise puisqu'il rassemble 63 IRIS (visibles sur la figure 2.42), c'est-à-dire 23 % des IRIS étudiés, soit près de 1 sur 4. Ces IRIS font 128 hectares en moyenne, correspondant à des quartiers de faible taille sans être parmi les plus réduits (qui font quelques dizaines d'hectares). Ils regroupent 180 596 habitants en 2014, soit 24 % de la population totale, sur une superficie de 80,656 km², soit 8 066 hectares ou encore 15 % de la superficie totale.

Quand on regarde les caractéristiques de cet archétype, on peut constater qu'il se trouve souvent très proche (à plus ou moins 26 % de la moyenne et 17,5 % de la médiane) des moyennes métropolitaines, ce qui en fait d'ailleurs la forme la plus « moyenne » des archétypes créés.

Parmi ses faits saillants, on peut remarquer une proportion de 21,096 % (9,864 [105]) en moyenne d'espaces naturels, c'est-à-dire une valeur faible *a priori* dans l'absolu

105. La valeur entre parenthèse indique ici et dans la suite du manuscrit l'écart-type du paramètre au sein du groupe d'IRIS.

mais légèrement plus importante de quelques points que la moyenne métropolitaine – 19,188 % (16,171). Inversement, la surface est moins intensément bâtie que le reste du territoire, avec 13,672 % (3,198) contre 19,8 % (13,834). Il y a globalement assez peu de routes, des parcelles de taille faible, de l'ordre de 1 200 m^2, ce qui correspond bien à une banlieue ou à des petites villes comprenant des maisons avec jardins. L'entropie est également assez basse, témoignant d'une uniformité des modes d'occupation des sols.

Centre historique

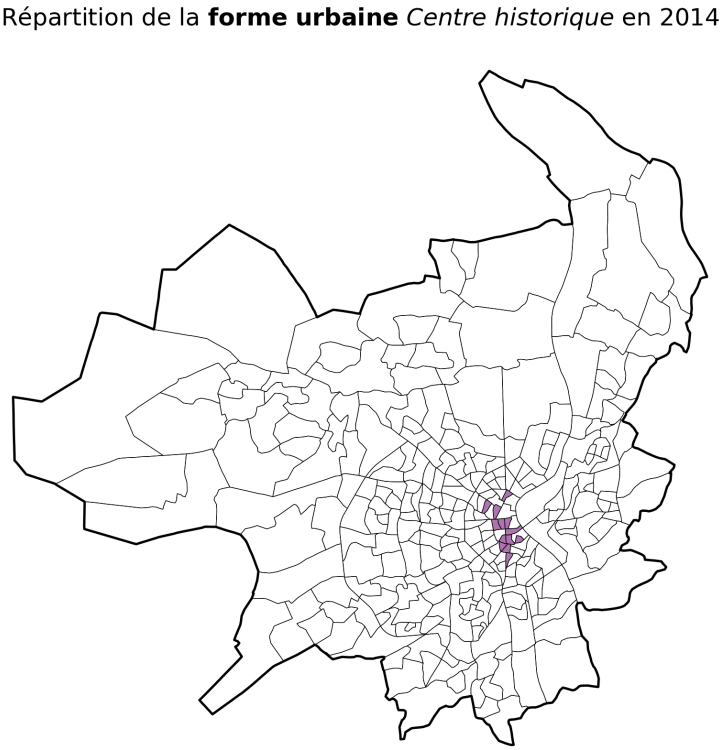


FIGURE 2.43 – Carte des IRIS de l'archétype « *Centre historique* » en 2014.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	56,3110	57,6349	5,2987
Écoles (%)	0,9182	0,3685	1,6325
Végétation (%)	3,2213	2,4168	2,8262
Parkings (%)	1,4034	0,8477	1,7327
Autoroutes (%)	0,0000	0,0000	0,0000
Nationales (%)	0,2106	0,0000	0,7595
Départementales (%)	2,7251	3,3972	2,2198
Autres routes (%)	11,5790	11,9257	2,3999

TABLEAU 2.6 – Tableau présentant les caractéristiques de l'archétype « *Centre historique* ».

Ce deuxième archétype concerne beaucoup moins d'IRIS (présentés dans la figure 2.43) puisqu'il représente une partie du centre historique de la métropole. Il englobe 13 quartiers d'une superficie totale bien plus faible de 1,840 km² ou 184 hectares, regroupant 35 732 habitants. Cette fois, les quartiers inclus sont de taille réduite puisqu'ils représentent chacun 14 hectares en moyenne [106], ce qui correspond aux surfaces les plus étroites des quartiers bordelais [107].

Cet archétype est caractérisé par des îlots de petite taille (la plus faible parmi les archétypes) [108], très peu d'aire végétalisée (3 %) [109] et beaucoup de terrain

106. 14,154 ha (2,589).
107. Les IRIS de Capucins-Victoire 1, 2 et 7, du centre historique de Bordeaux sont les minima de superficie sur la métropole et font environ 11 hectares chacun. Cette moyenne de 14 hectares est donc très faible, seuls 12 IRIS de la métropole peuvent prétendre être plus petits que ces 14 hectares.
108. 0,413 ha (0,130) en moyenne.
109. 3,221 % (2,826) en moyenne.

construit (plus de 56 %) [110]. Les parcelles sont nombreuses et de taille réduite. De plus, ces formes urbaines présentent une bonne porosité et un accès facile aux transports en commun, la surface occupée par des routes étant importante (la plus grande de tous les archétypes), avec 14,5 % de la surface occupée (contre 7,6 % en moyenne pour la métropole). Le sol est globalement utilisé de façon très uniforme avec un même type d'utilisation.

110. 56,311 % (5,299) en moyenne.

IV.3.b. De bâtiments

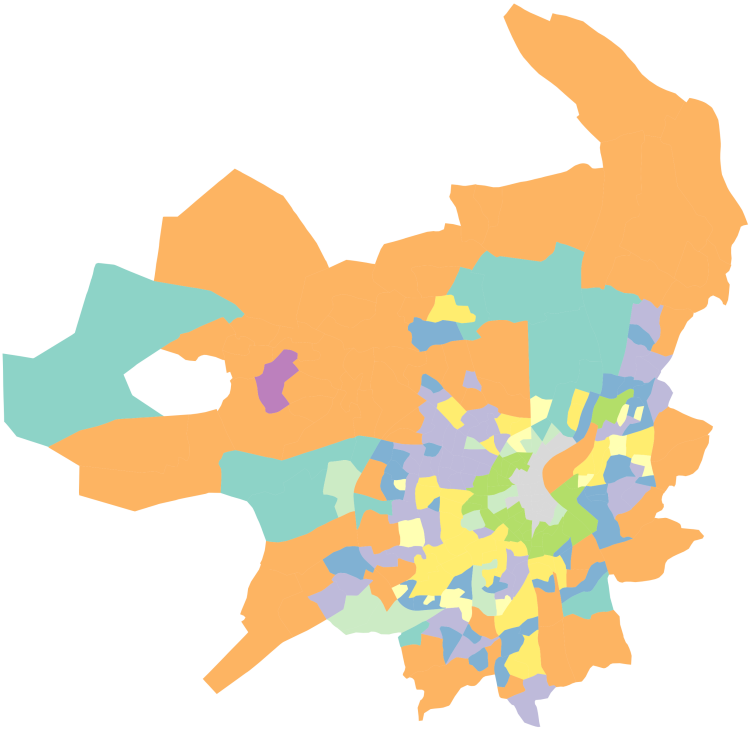


FIGURE 2.44 – Résultats du clustering pour le bâti avec l'algorithme agglomératif.

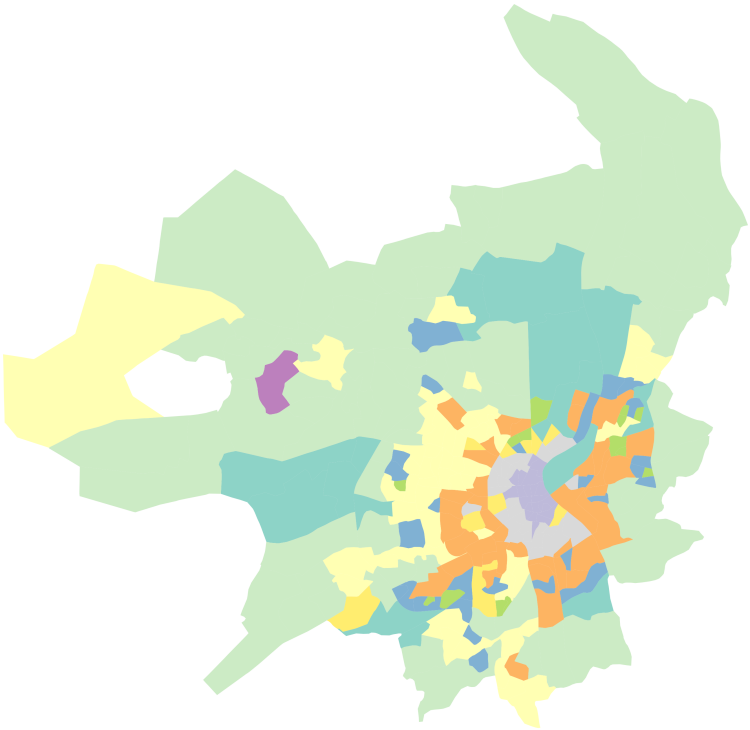


FIGURE 2.45 – Résultats du clustering pour les batiments obtenus par l'algorithme du k-means.

De façon similaire, deux cartes (voir figures 2.44 et 2.45) sont obtenues par les algorithmes *agglomératif* et *k-means* sur les paramètres des bâtiments. Elles présentent des caractéristiques très similaires en terme de distribution géographique : les

clusters sont répartis sous une forme grossière de cercles concentriques au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre de Bordeaux, les espaces périurbains sont largement morcelés, quelques centres-villes extérieurs sont regroupés (mais beaucoup moins que pour les formes urbaines). Ce dernier point peut s'expliquer au regard de l'analyse des axes principaux (*cf.* section IV.2 plus haut [111]) : les facteurs tirant le plus le premier axe sont la disponibilité de voiture et la taille des bâtiments. Il semble peu surprenant que les habitants de centres de moyennes ou petites villes peu raccordés aux réseaux de transport en commun aient en effet des voitures en proportion similaire aux habitants des zones plus éloignées.

On peut constater en outre, peut-être pour des raisons proches, que les *clusters* ruraux sont plus larges et plus uniformes que dans le cas des archétypes de sols. De même que dans la partie précédente, les IRIS périurbains varient beaucoup d'un essai sur l'autre. Toutefois, on peut noter que le centre de la métropole reste relativement constant et plus large que dans les archétypes de formes urbaines. Les écarts entre la version de l'algorithme agglomératif et le k-means sont plus importants également, ce qui témoigne d'une plus grande diversité de bâtiments et confirme en ce sens les résultats de l'ACP.

Les archétypes utilisés

Les résultats définitifs de archétypes de bâtiments sélectionnés pour la suite de la modélisation sont représentés dans la figure 2.46. De la même façon que dans la section précédente, nous ne présenterons ici que deux archétypes [112], les « *Larges bâtiments d'activité* » et les « *Bâtiments à forte densité* », . Ces archétypes sont caractérisés par une densité de population et d'emplois par m² de sol utilisé mais aussi par une hauteur moyenne et une répartition des surfaces parmi les différentes classes d'efficacité énergétique [113].

111. On pourra aussi se référer à la section II de l'annexe D, p. 396, qui détaille cette description des trois premiers axes calculés par l'ACP sur les bâtiments.

112. Voir l'annexe F, p. 423, pour le détail de l'ensemble des archétypes inclus dans le modèle.

113. Ces classes sont déterminées par un *diagnostic de performance énergétique* (DPE) obligatoire pour la mise en vente ou location d'un logement ou local et vont de A (les plus efficaces) à G (les moins efficaces).

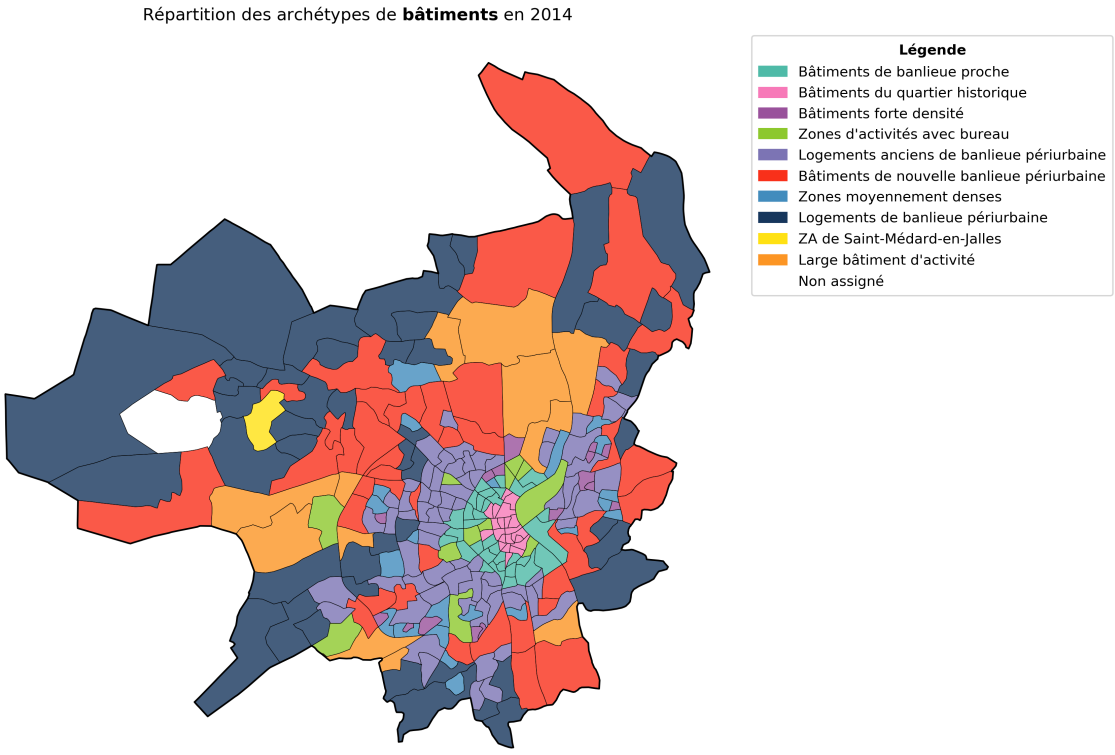


FIGURE 2.46 – Résultats définitifs des archétypes de bâtiments obtenus par l'algorithme du k-means..

Larges bâtiments d'activités

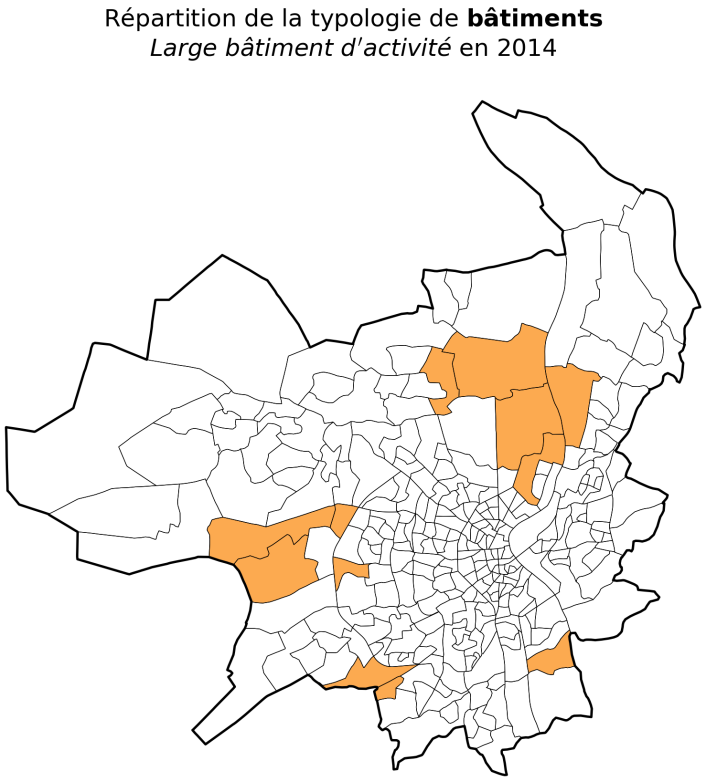


FIGURE 2.47 – Carte des IRIS de l'archétype « *Larges bâtiments d'activités* » en 2014.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	829,5621	808,6980	700,8286
Nombre d'emplois par km² de bâti	34 162,1458	32 094,9105	18 667,1122
Hauteur moyenne (en m)	6,1914	5,8583	1,2902
Classe énergétique A (%)	2,2361	1,9522	1,4574
Classe énergétique B (%)	10,0638	8,4166	4,8456
Classe énergétique C (%)	27,8187	26,4116	6,6065
Classe énergétique D (%)	43,4907	43,5687	8,1459
Classe énergétique E (%)	13,4675	13,5379	4,5823
Classe énergétique F (%)	2,4239	1,4274	2,0276
Classe énergétique G (%)	0,4988	0,2833	0,6133
Classe énergétique non connu (%)	0,0006	0,0000	0,0018

TABLEAU 2.7 – Tableau présentant les caractéristiques de l'archétype « *Larges bâtiments d'activités* ».

Ce premier archétype de bâtiment est visible dans des IRIS répartis dans l'ensemble du territoire de la métropole (voir figure 2.47). Il regroupe 12 IRIS recouvrant 56,208 km², soit environ un dixième de la superficie totale de la métropole. 3 527 habitants y sont logés, ce qui est très faible pour la superficie concernée. Les IRIS sont d'une taille moyenne de 4,684 km² ou 468 hectares, correspondant à de larges IRIS [114].

Les bâtiments sont de hauteur moyenne dans l'ensemble, avec une valeur très

114. Seuls 25 IRIS sur 277 sont plus étendus que cette moyenne dans la métropole.

proche de la moyenne métropolitaine. Néanmoins, les bâtiments, avec des tailles au sol de 24 m par 24 m environ, bien au-dessus des 17 m par 10 m en général à Bordeaux, sont bien plus larges que sur l'ensemble de la métropole et utilisent ainsi des volumes importants. Ces locaux, très peu utilisés pour des logements, abritent une part importante d'employés au m^2, à la fois en industrie et en service.

Cet archétype regroupe des bâtiments plutôt récents, avec des périodes de construction plutôt concentrées entre 1990 et aujourd'hui. En moyenne, seuls 25 % des locaux et logements de cet archétype ont été construits avant 1990. Les efficacités énergétiques forment une cloche autour de la classe D (43,5 % de la surface) avec peu de passoires énergétiques (moins de 3 % en classes F et G en moyenne) mais aussi peu de très bonnes performances (2,2 % de classe A).

Bâtiments à forte densité

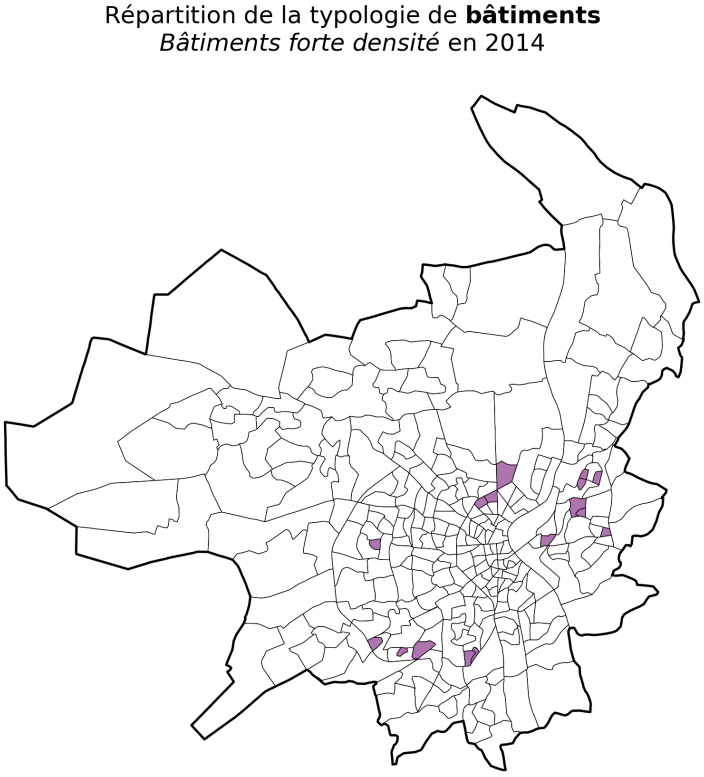


FIGURE 2.48 – Carte des IRIS de l'archétype « *Bâtiments à forte densité* » en 2014.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	67 251,6671	65 577,8070	18 850,9016
Nombre d'emplois par km² de bâti	18 447,4030	8 357,5270	26 009,7034
Hauteur moyenne (en m)	11,1263	9,6238	3,9073
Classe énergétique A (%)	0,5942	0,2027	1,1619
Classe énergétique B (%)	5,0835	4,2377	4,1316
Classe énergétique C (%)	19,2712	20,3531	4,4904
Classe énergétique D (%)	50,4583	46,8230	10,7469
Classe énergétique E (%)	19,6391	21,3417	6,3703
Classe énergétique F (%)	3,8805	4,0036	2,4578
Classe énergétique G (%)	1,0705	0,6690	1,0517
Classe énergétique non connu (%)	0,0027	0,0000	0,0076

TABLEAU 2.8 – Tableau présentant les caractéristiques de l'archétype « *Bâtiments à forte densité* ».

Ce deuxième archétype construit est à nouveau largement diffusé dans le territoire autour de Bordeaux (cf. figure 2.48). Il ne regroupe lui aussi que 16 IRIS sur 4,812 km² ou 481 hectares mais loge toutefois sur cette surface plus réduite 40 616 habitants en 2014.

Les bâtiments de cet archétype sont également de large taille, tant en surface au sol avec des moyennes comparables à celles de l'archétype précédente, qu'en hauteur avec une moyenne de 11,126 m (3,907), soit environ deux étages de plus que la moyenne métropolitaine. Cette moyenne est vraisemblablement tirée vers le haut par des valeurs extrêmes puisque la médiane du groupe n'est qu'à 9,6 m

et que l'écart-type est de 3,9 m. Ce facteur, combiné au faible nombre moyen de bâtiment par IRIS (93 alors que les IRIS en abritent généralement plus de 1 000 dans la métropole) suggère que ces formes correspondent à des tours de logements. En effet, la proportion d'habitants par m^2 au sol est la plus forte de toute la métropole, doublant la valeur du deuxième archétype utilisant le plus densément le sol. Il y a globalement peu d'employés par m^2 de bâti.

Ces bâtiments ont globalement été construits entre les années 50 et 80, avec une proportion moyenne de 75 % pour les périodes 1949-1967, 1967-1974 et 1975-1981. Enfin, on peut constater que les systèmes de chauffage utilisés sont principalement collectifs, à 85,456 % (1,057) en moyenne contre 16,351 % (24,740) dans le reste du territoire [115]. Les performances énergétiques sont moins bonnes que celles de l'archétype précédent avec une proportion plus importante (environ 75 %) de bâtiments dans les classes D, E, F et G (contre 60 % pour les *Larges bâtiments d'activités*).

Les personnes disposent enfin de très peu de garages proportionnellement au reste de la métropole (seul l'archétype de bâtiments correspondant au centre historique y est moins associé en moyenne).

Comparaison avec TABULA

La construction de ces archétypes a impliqué un grand nombre de paramètres mais rend possible la comparaison avec d'autres bases d'archétypes. La base TABULA/EPISCOPE [116] pour la France par exemple, réalisée par Pouget Consultants, décrit, pour les dix périodes sélectionnées, quatre typologies, produisant quarante archétypes. Chacun de nos archétypes est alors un rassemblement de plusieurs archétypes de cette base de données : en effet, nos classes ne regroupent pas toujours des bâtiments d'une forme unique (seulement des maisons individuelles, des immeubles collectifs) ni d'une seule période. Le tableau 2.9 expose les formes majoritaires que l'on peut retrouver dans chacun des groupes créés à partir des résultats de l'algorithme du *k-means* appliqué aux bâtiments.

115. Cette valeur est extrêmement élevée et caractéristique puisque même la médiane métropolitaine est de 4,779 %, témoignant de la majorité écrasante d'utilisation de système de chauffage individuel (électrique ou non).

116. Voir partie I.3.a pour plus d'informations.

Notre proposition	Base TABULA - France	
Archétype	*Période*	*Typologie*
Large bâtiment d'activité	1990-1999 2000-2005 2006-2012 après 2012	Grands logements collectifs
Zones moyennement denses	1949-1967 1968-1974 1975-1981 après 2012	Petits logements collectifs
Bâtiments de nouvelle banlieue périurbaine	2006-2012	Maisons individuelles détachées Maisons individuelles mitoyennes
	après 2012	Maisons individuelles détachées Maisons individuelles mitoyennes
Zones d'activités avec bureau	2000-2005 2006-2012	Petits logements collectifs
Bâtiments forte densité	1949-1967 1968-1974 1975-1981	Grands logements collectifs
Bâtiments de banlieue proche	avant 1915	Maisons individuelles détachées Maisons individuelles mitoyennes
	1915-1948	Maisons individuelles détachées Maisons individuelles mitoyennes
ZA de Saint-Médard-en-Jalles	1915-1948 1949-1967	Petits logements collectifs
Logements de banlieue périurbaine	1975-1981	Maisons individuelles détachées Maisons individuelles mitoyennes
	1982-1989	Maisons individuelles détachées Maisons individuelles mitoyennes
	1990-1999	Maisons individuelles détachées Maisons individuelles mitoyennes
Logements anciens de banlieue périurbaine	1915-1948	Maisons individuelles détachées Maisons individuelles mitoyennes
	1949-1967	Maisons individuelles détachées Maisons individuelles mitoyennes
Bâtiments du quartier historique	avant 1915	Petits logements collectifs Grands logements collectifs

TABLEAU 2.9 – Associations entre les archétypes de bâtiments créées ici et les archétypes construits par le projet européen TABULA.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord constaté les changements importants survenus au cours des dernières décennies autour de la donnée. Que ce soit dans sa création ou dans sa manipulation, de larges progrès ont été faits et ont conduit à de nombreuses applications dans des domaines variés comme la médecine, les jeux vidéos ou la sécurité. La ville ne fait pas exception à cette révolution numérique et prend de plus en plus appui sur ces outils, particulièrement grâce aux *systèmes d'information géographique* (SIG). La communauté scientifique et les collectivités territoriales ont ainsi mis à profit ces progrès, comme en témoignent les nombreuses études d'une part et les plateformes d'open-data d'autre part. Pour autant, un vaste champ d'applications reste ouvert, particulièrement auprès des agences privées d'urbanisme. Parmi les multiples techniques employées, la construction d'archétypes a fait ses preuves dans la description de la ville et plus spécifiquement des bâtiments : une rapide revue de la littérature scientifique a ainsi souligné l'efficacité de cette méthode pour l'estimation de la consommation d'énergie à des échelles variant du bâtiment seul à la ville entière. Ces conclusions soulignent la pertinence de l'utilisation d'archétypes pour l'étude d'un territoire large tel que la métropole de Bordeaux.

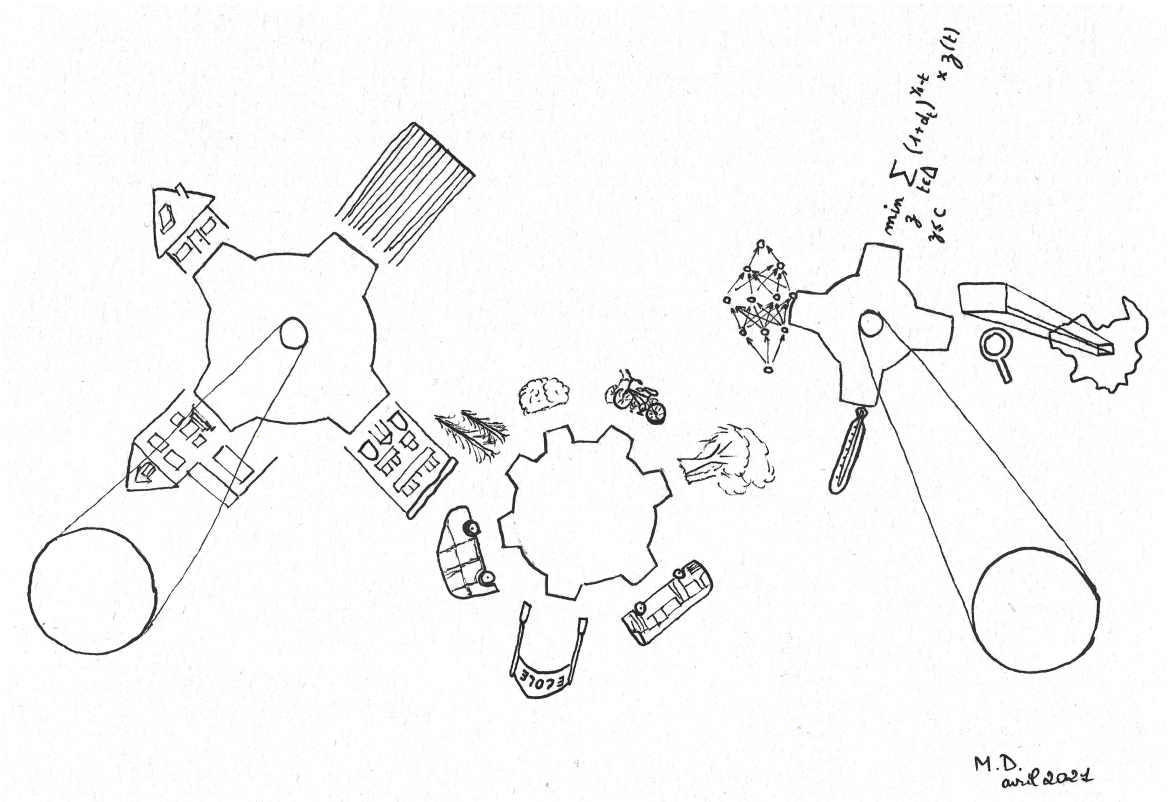
Il existe plusieurs façons d'obtenir des archétypes (bases de données existantes, statistiques, experts, etc.). Pour s'assurer que les archétypes employés pour la modélisation long-terme soient propres aux communes de Bordeaux Métropole et en capturent les spécificités, nous avons présenté une méthodologie statistique permettant la construction de tels archétypes. Cette méthodologie s'appuie sur la récupération de données quantatives courantes et accessibles afin de garantir la réplicabilité ultérieure de notre *approche* à d'autres territoires. À cette fin, nous avons employé un découpage spatial national, celui des IRIS. L'ensemble des paramètres récupérés sont agrégés à cette maille territoriale.

Les données sont tout d'abord séparées en deux familles de paramètres : les premiers décrivent les formes urbaines, c'est-à-dire la façon dont le sol est occupé ; les seconds caractérisent les bâtiments. Elles sont ensuite traitées et étudiées.

Ces analyses aboutissent enfin à l'application d'algorithmes de *clustering* et à la construction de deux groupes de dix archétypes. Ces archétypes correspondent bien à des formes urbaines et des bâtiments connus et reconnaissables et ouvrent la voie à l'intégration dans notre modèle long-terme, TIMES-URBAN.

Chapitre 3

Développement d'une chaîne de modélisation : de TIMES-URBAN à l'estimation de la température



Où l'on développe plusieurs modèles appuyés les uns sur les autres pour construire notre approche prospective...

La récupération et le traitement de données quantitatives sur la métropole de Bordeaux a permis d'aboutir à la création d'archétypes de formes urbaines et de bâtiments. Ces éléments, régulièrement utilisés dans la modélisation urbaine et nécessaires pour la construction de notre modèle, ne se suffisent pas à eux-mêmes : il ne faut pas perdre de vue notre objectif initial qui reste de construire un modèle long terme tourné vers l'aide à la prise de décision et à la planification urbaine en se concentrant sur l'évolution de l'occupation des sols. Les archétypes doivent donc être insérés dans une modélisation plus large de la métropole permettant une représentation globale des secteurs pertinents pour notre approche, une description de contraintes correspondant à différents scénarios d'aménagement, et un système d'optimisation calculant les meilleures trajectoires au regard d'un critère ou d'une fonction objectif préalablement choisi. Enfin, nous avons également souligné l'importance de la communication de ces résultats et notamment de la représentation spatiale d'un indicateur.

Nous aborderons ainsi tout d'abord la structure du modèle long terme TIMES-URBAN développé au cours de ce travail de thèse en présentant les trois dimensions principales (sols, bâtiments et transports), avant de détailler les contraintes et scénarios implémentés (section I). Nous expliciterons ensuite la méthodologie de projection spatiale déployée par le modèle URBAN-SPATIALIZER sur les sorties de TIMES-URBAN, nous permettant de créer une carte spatiale d'évolution des occupations des sols (section II). Enfin, nous décrirons notre développement et utilisation d'un réseau de neurones à convolution, URBAN-TEMPÊST, pour l'estimation de la valeur d'un macro-paramètre, la température, à partir des résultats projetés (section III).

I. TIMES-URBAN, un modèle urbain bottom-up original

Le choix du système utilisé dans le cadre de modélisation est toujours délicat. Ainsi que nous l'avons argumenté dans la section V.3, la famille de générateurs de modèles MARKAL/TIMES est adéquate pour notre approche prospective. Les développements réalisés au cours de la thèse ont permis en même temps d'établir quelques propositions d'avancées dans les applications spatiales de ces modèles long-termes. Le modèle construit au cours de ce travail de thèse est donc inspiré, dans le principe, des études précédentes basées sur des modèles TIMES [MAÏZI (2016)]. Néanmoins, notre proposition introduit une rupture majeure en ne considérant non plus des flux énergétiques mais des ressources liées à l'occupation des sols et aux constructions associées. Ainsi, là où l'on retrouve d'habitude un **système énergétique de référence** (ou *Reference Energy System*) [LOULOU et al. (2005)], il est plus pertinent de parler ici de **système d'aménagement de référence** (ou *Reference Land System*).

Cette section va décrire dans un premier temps la structure générale de TIMES-URBAN en précisant son découpage spatial et temporel, et la demande finale utilisée pour piloter le modèle (voir partie I.1). Nous verrons ensuite une description plus détaillée du fonctionnement des deux secteurs principaux, celui ayant trait à l'occupation des sols et aux bâtiments, et celui du transport (voir partie I.2).

Enfin, nous résumerons dans une dernière partie les contraintes principales appliquées au problème d'optimisation (voir partie I.3).

I.1. Une structure novatrice de système de référence

La structure générale d'un modèle TIMES peut être résumée ainsi : une demande finale doit être satisfaite par un ensemble de *process* qui consomment et produisent des *commodités*. Une commodité est une ressource (sol, énergie, etc.), tandis qu'un *process*, ou *technologie*, est la brique élémentaire de construction du système de référence, qui prend ainsi une ou plusieurs commodités en entrée qu'il transforme en autres commodités. Un *process* est également caractérisé par des paramètres tels qu'un rendement, une durée de vie, un coût… L'organisation générale du modèle est ensuite semblable à celle d'un graphe orienté dont les nœuds sont des *process* et les arêtes des flux de commodités. La figure 3.1 présente un exemple de *process* et de commodités utilisés dans TIMES-URBAN.

FIGURE 3.1 – Schéma d'un exemple de *process* : un bâtiment consomme ainsi du terrain qui a été assigné aux constructions pour produire des logements et des locaux professionnels.

I.1.a. Découpage spatial et temporel

Les modèles TIMES nécessitent avant toute chose la définition de périmètres géographiques (non spatiaux) capables d'interagir entre eux et disposant de leur propre système d'aménagement de référence, les **zones**, ainsi qu'une division de l'horizon temporel considéré.

Le territoire de la métropole de Bordeaux a été pour cela découpé en 19 zones, suivant le découpage de l'enquête Ménages Déplacements de 2009 réalisée pour la Communauté Urbaine de Bordeaux [1] puis pour l'enquête Mobilité Ménages de 2017 [BORDEAUX MÉTROPOLE (2019) et CUB et al. (2009)], afin de faciliter le traitement et l'utilisation des données relatives au transport. Nous avons choisi dans le chapitre précédent la séparation en IRIS pour la création des archétypes, que suit logiquement l'enquête Ménages Déplacements [2]. Le découpage utilisé par celle-ci, présenté dans la figure 3.2, suit en effet, à quelques exceptions mineures, près les délimitations des IRIS et nos résultats d'archétypes s'y adaptent donc aisément. Le tableau 3.1 présente quelques caractéristiques de ces zones.

Nous avons sélectionné l'année 2014 comme *année de référence*, et une précision annuelle, c'est-à-dire que nous ne faisons pas de distinction à l'intérieur de

1. L'entité qui a précédé Bordeaux Métropole jusqu'en 2015.
2. Nous avions noté dans la section II.1 du chapitre 2, p. 112, que le découpage de l'INSEE en IRIS était l'échelle la plus communément utilisée en France pour des études statistiques à une échelle *infra-communale* : ce principe est bien vérifié ici.

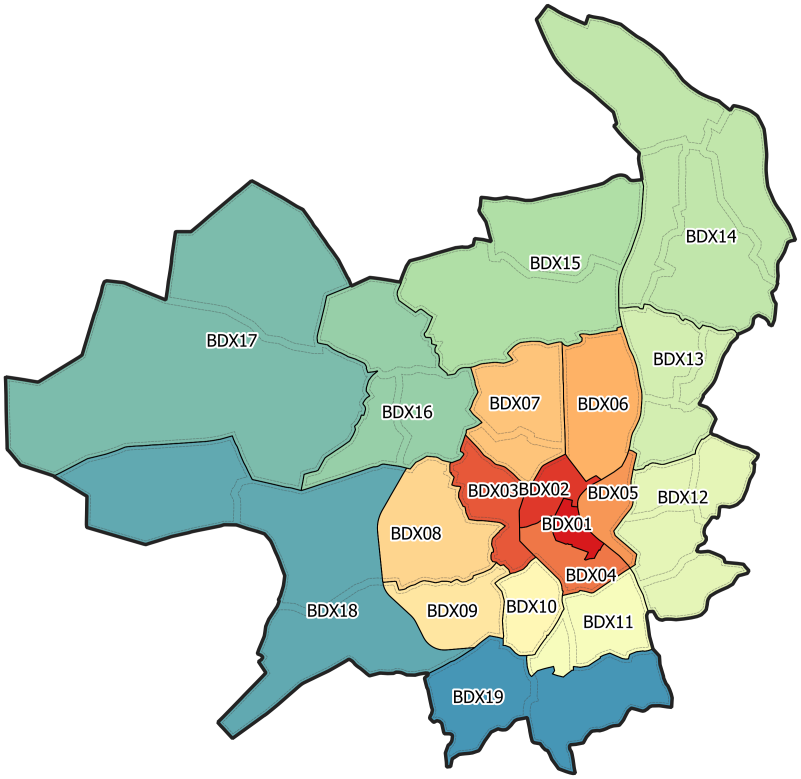


FIGURE 3.2 – Découpage en 19 zones utilisé par TIMES-URBAN. Les délimitations des communes figurent en pointillés.

Zone	*Nombre d'IRIS*	*Population (hab)*	*Aire (km²)*
BDX01	13	36 295	2,494
BDX02	20	55 530	4,981
BDX03	20	55 442	10,098
BDX04	21	56 411	6,819
BDX05	5	16 305	4,760
BDX06	9	23 642	14,983
BDX07	14	40 161	18,037
BDX08	22	62 230	20,039
BDX09	14	38 932	11,978
BDX10	13	41 517	8,336
BDX11	12	32 749	13,024
BDX12	19	50 462	28,651
BDX13	17	35 010	20,292
BDX14	7	20 915	59,451
BDX15	10	23 219	50,498
BDX16	14	41 258	36,269
BDX17	14	35 717	119,384
BDX18	15	35 342	80,368
BDX19	18	48 457	32,568

TABLEAU 3.1 – Quelques caractéristiques des 19 zones utilisées pour le découpage de TIMES-URBAN.

l'année entre les différents mois ou entre les saisons : une année dans TIMES-URBAN est donc monolithique et indivisible. En effet, pour ce premier exercice de modélisation long terme d'un milieu urbain et étant donné les technologies décrites, c'est-à-dire bâtiments, formes urbaines, infrastructures, il ne nous est pas apparu capital de procéder à un découpage temporel plus fin : l'intégration de technologies énergétiques (panneaux solaires, éoliennes), de notions relatives au tourisme ou aux vacances, d'informations sur le trafic routier justifieraient, dans des développements ultérieurs, l'affinement des divisions temporelles.

TIMES permet de sauter des années pour alléger les calculs. L'horizon temporel est découpé en périodes, chaque période pouvant compter plusieurs années. Nous considérons donc les périodes 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023-2025, 2026-2030, 2031-2035, 2036-2040, 2041-2045 et 2046-2050. Ces périodes seront désignées par leur année de fin par la suite (2025 pour la période 2023-2025).

I.1.b. Système d'aménagement de référence

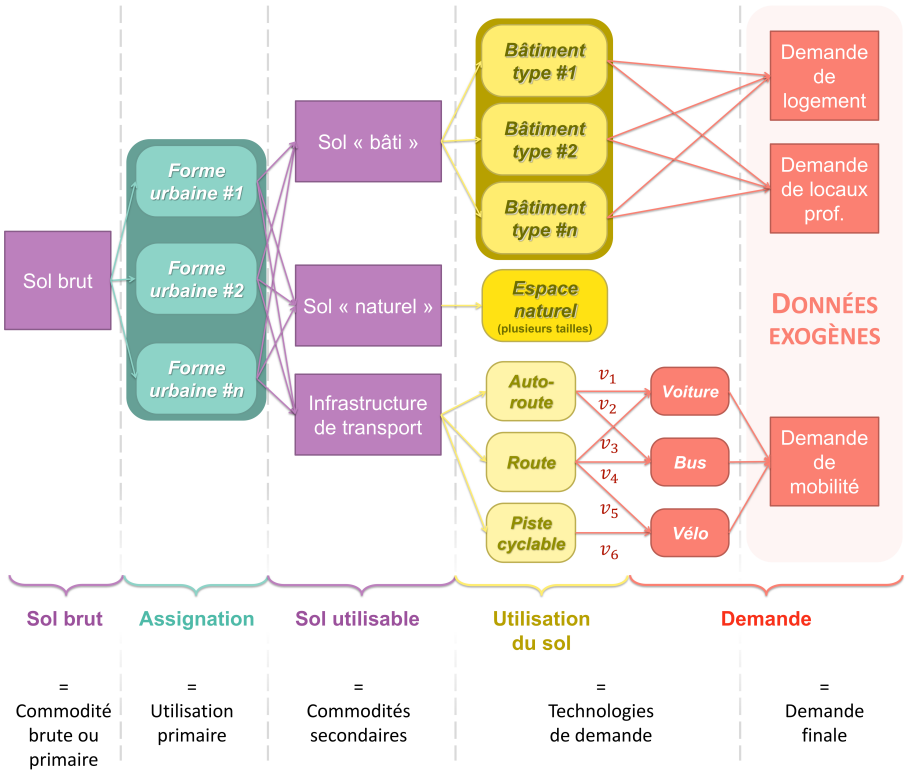


FIGURE 3.3 – Version simplifiée du Système d'Aménagement de Référence (SAR). En pratique, il y a *dix technologies* de « formes urbaines » différentes, issues des dix archétypes correspondants créés au chapitre précédent, et *dix technologies* de bâtiments différentes, de même paramétrées à partir des résultats du *clustering*. En outre, les infrastructures de transport sont séparées en plusieurs formes différentes que nous verrons plus loin.

Notre modèle est organisé afin de reproduire l'organisation du territoire et de l'aménagement. Tout d'abord, le sol est non assigné. Puis, les formes urbaines le distribuent entre différents usages : le bâti, la route, les espaces naturels, etc. Les surfaces dédiées au bâti peuvent être ensuite utilisées pour ériger des bâtiments de logement et de locaux d'activités ou des équipements publics. Le graphe de l'organisation des principaux *process* et commodités peut donc être séparé en

trois parties différentes [3] : les technologies dites **primaires**, qui transforment le sol brut ou commodité primaire, et l'assignent à un usage (par exemple, à la végétation, aux infrastructures, au bâti…), les technologies dites **secondaires**, qui utilisent et transforment le sol assigné ou commodité secondaire (par exemple, en construisant un bâtiment sur un sol défini comme bâtissable), et les technologies de demande, qui répondent à la demande finale (par exemple, celle de logement, d'emplois…). Le schéma 3.3 présente l'organisation du modèle selon ces principes. Dans notre cas, nous avons mis l'accent sur les technologies primaires (les formes urbaines) et de demande (les bâtiments) et avons simplifié la situation en laissant de côté les aspects socio-économiques des comportements des habitants.

Cette famille de modèles, par construction, permet la compétition et la substitution entre les technologies disponibles, ce qui rend bien compte de la concurrence entre les différents usages des sols possibles, largement documentée dans beaucoup de situations, en particulier entre de nouvelles zones urbaines et des terrains agricoles pour l'alimentation – directe ou indirecte – ou les bio-fuels [Allen (2016), Debolini et al. (2015), Harvey et Pilgrim (2011), Lemonsu et al. (2015), Torre et al. (2014) et White et al. (1997)].

I.1.c. Fonction objectif ou de coût

La fonction objectif du modèle d'optimisation linéaire construite par le framework MARKAL-TIMES rassemble à la fois les nouveaux investissements réalisés chaque année pour répondre à la demande finale et les coûts liés à l'utilisation annuelle des technologies. De manière générale, la formulation du problème d'optimisation linéaire d'un modèle TIMES est la suivante :

$$\min \sum_{y \in years} (1 + d_y)^{REFYEAR - y} \times ANNCOST(y) \tag{3.1}$$

avec

- $REFYEAR$ l'année de référence de l'exercice,
- $years$ l'ensemble des périodes considérées à partir de cette année de référence,
- d_y le taux d'actualisation appliqué,
- $ANNCOST(y)$ le coût annuel de l'ensemble du système qui prend en compte coûts d'investissements et coûts d'activité des technologies.

Cette fonction de coût privilégie les opérations ayant un faible coût non seulement dans l'attribution d'un usage aux sols mais aussi dans les possibilités associées de construction de bâtiments et de mobilités.

À cette formulation sont ajoutées des contraintes que doivent respecter les variables de décision. Ces contraintes sont généralement classées en quatre catégo-

3. On pourra noter ici l'inspiration des systèmes énergétiques de référence : les termes employés sont les mêmes, le découpage en secteurs reste très similaire. Cela est certes dû en partie à la structure du générateur de modèles TIMES mais aussi à la logique interne de telles séparations. De plus, le respect de cette séparation en secteurs laisse envisager une intégration ultérieure dans un modèle énergétique plus général, par exemple avec l'ajout des sols agricoles ou encore du secteur industriel sur des principes similaires.

ries : (*i*) les contraintes de *demande* qui fixent les niveaux de demandes finales que le modèle doit satisfaire ; (*ii*) les contraintes *techniques* internes pour la caractérisation des technologies ; (*iii*) les contraintes en *ressources* qui indiquent les limites de gisements de certaines commodités (la surface totale de la métropole est ainsi fixe) ; enfin, (*iv*) les contraintes *supplémentaires* qui permettent au modélisateur de concevoir un scénario [MILLOT (2019)].

L'annexe G, p. 449, expose la formulation mathématique du problème d'optimisation décrit par TIMES-URBAN tandis que les contraintes principales de TIMES-URBAN seront décrites dans la section I.3 du présent chapitre, p. 197.

I.1.d. La demande finale : les besoins de la population

Dans un modèle piloté par la demande, le choix de cette dernière et sa configuration dans la structure globale sont importants. La croissance démographique et les politiques locales sont les principaux facteurs qui influencent et motivent l'expansion urbaine. En croissant, une ville voit sa vulnérabilité climatique augmenter par une hausse de la surface artificialisée (et donc de l'imperméabilisation des sols et de la réflexion de la lumière), de la tension sur les ressources naturelles, de la pollution de l'air, etc. [VIGUIÉ et al. (2014b)] Il semble assez naturel quand on étudie la ville, d'avoir comme objectif premier de loger une population [4], les autres problématiques (l'emploi, les questions environnementales…) en découlant ensuite [CAGLIONI (2019) et VANIN (2019)].

La demande finale de notre modèle est donc le nombre d'habitants qui ont besoin de logements, d'emplois et de la possibilité de se déplacer. Ces trois sous-demandes sont gérées en interne dans le modèle et pourraient être raffinées [5]. Un habitant équivaut ainsi à 1 place de logement, 0,4278 emploi et $7{,}924 \times 10^{-4}$ école ; autrement dit, il y a un emploi pour 2,3378 habitants et une école pour 1 261,9849 habitants. Ces données sont extraites de la situation à Bordeaux et en France actuellement, d'après l'INSEE : en 2014, il y avait ainsi 325 499 emplois pour 760 933 habitants à Bordeaux et 52 225 écoles pour 65 907 160 habitants en France [6].

Nous avons utilisé le scénario de demande finale tel que présenté dans le graphe 3.4. La courbe suit la tendance proposée par l'INSEE dans son scénario central entre 2014 et 2050.

Les demandes de déplacements de courte et longue distance (présentées avec la population ainsi que le budget de temps total de chaque zone dans le tableau 3.2)

4. Il aurait été également possible de faire abstraction de la population en se concentrant sur un nombre de bâtiments ou une superficie totale, proportionnelle à la population, mais cela ignore, *a priori*, les autres secteurs que sont l'emploi ou le transport.

5. Par exemple, il serait faisable de décomposer la population en plusieurs classes ou groupes ayant des besoins variés. Les travaux de Le Gallic sont un premier pas très intéressant dans cette voie [LE GALLIC (2017b)].

6. L'ensemble de ces taux, logement, emploi et école par habitant, sont des moyennes à l'échelle de la métropole bordelaise. Ils mettent volontairement de côté un grand nombre de situations tels que les personnes sans domicile fixe, les chômeurs, les enfants non scolarisés, tous ces cas étant intégrés dans la moyenne qui ne correspond pas à un « Bordelais » parfait ou heureux mais simplement à un « Bordelais » statistiquement moyen. La création de plusieurs catégories de population ou la décomposition d'un « Bordelais moyen » en plusieurs portraits d'habitants seraient des améliorations envisageables, tel que cela a été mentionné dans la note 5, p. 181.

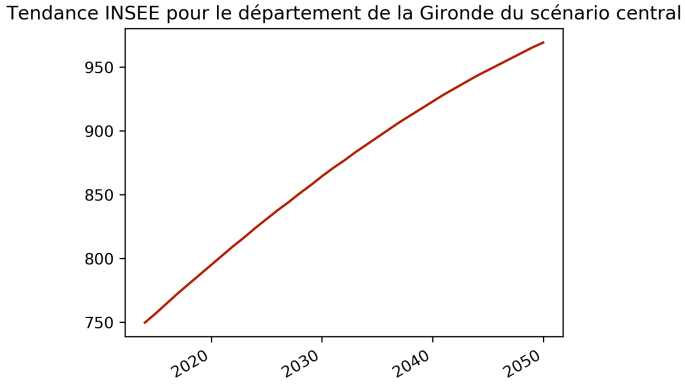


FIGURE 3.4 – Tendance de population utilisée comme demande de base.

Zone	**Courte distance** en million passager km/an	*par hab.*	**Longue distance** en million passager km/an	*par hab.*	**Budget temps** en 10^7 heures	en heures *par hab.*	**Population** en habitants
BDX01	85,52	2 356,17	9,52	262,33	1,54	424,30	36 295
BDX02	190,06	3 422,73	10,16	182,92	2,38	428,02	55 530
BDX03	266,20	4 801,37	14,75	266,00	2,35	423,89	55 442
BDX04	172,97	3 066,19	19,26	341,38	2,41	426,65	56 411
BDX05	59,58	3 654,14	6,11	374,95	0,695	426,50	16 305
BDX06	76,12	3 219,47	17,70	748,53	1,05	443,31	23 642
BDX07	173,59	4 322,35	32,72	814,70	1,73	431,35	40 161
BDX08	316,42	5 084,63	43,09	692,46	2,67	429,13	62 230
BDX09	151,49	3 891,08	42,01	1 079,03	1,66	426,16	38 932
BDX10	135,60	3 266,10	32,97	794,19	1,74	419,03	41 517
BDX11	126,81	3 872,23	30,84	941,58	1,40	427,76	32 749
BDX12	236,62	4 689,12	41,45	821,34	2,21	437,25	50 462
BDX13	175,28	5 006,65	29,51	842,87	1,50	427,50	35 010
BDX14	96,42	4 609,94	61,62	2 946,14	0,917	438,32	20 915
BDX15	55,92	2 408,31	96,23	4 144,40	0,992	427,34	23 219
BDX16	186,02	4 508,62	116,02	2 812,00	1,79	433,99	41 258
BDX17	77,16	2 160,42	170,74	4 780,41	1,54	431,52	35 717
BDX18	111,85	3 164,80	108,38	3 066,62	1,51	426,31	35 342
BDX19	165,45	3 414,24	143,14	2 953,94	2,08	428,45	48 457

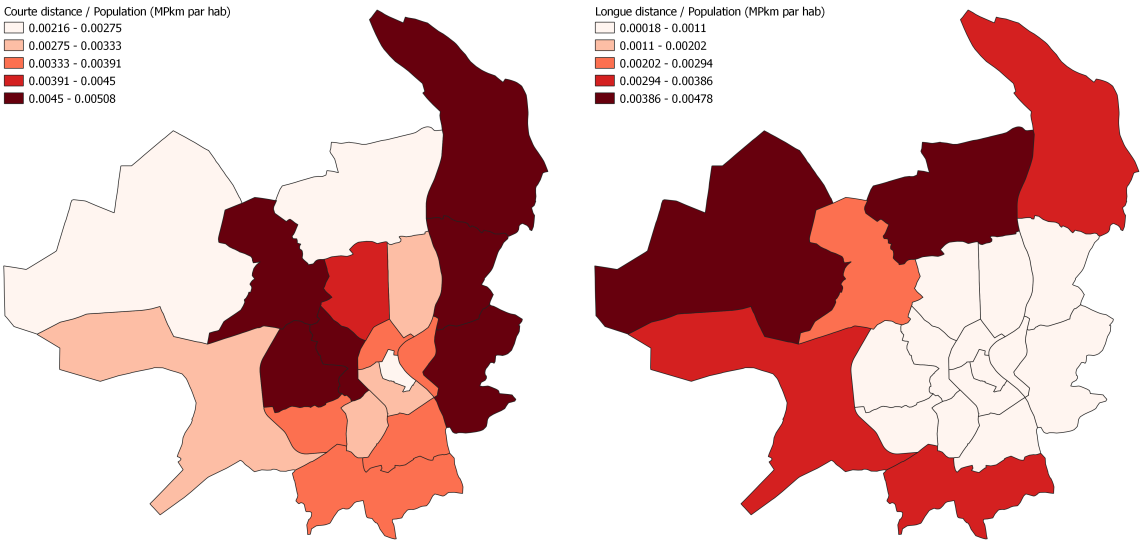
TABLEAU 3.2 – Demandes finales pour chaque zone du modèle TIMES-URBAN en 2014.

sont les demandes finales pour le secteur du transport. Ces deux commodités supplémentaires sont proportionnelles à la population : un habitant X a T temps pour la mobilité qu'il doit utiliser pour faire D_s et D_l km par an. Les coefficients de proportionnalité varient selon la zone considérée [7] puisque nous nous appuyons sur des enquêtes sur la métropole bordelaise pour l'estimation des besoins en déplacements court et longue distance des habitants. Aussi, ces rapports de proportionnalité sont issus des données statistiques récupérées sur la métropole dans deux études sur la métropole de Bordeaux (initialement CUB puis Bordeaux Métropole), réalisées en 2009 et 2017 [8].

Ainsi, les proportions, visibles sur les figures 3.5a et 3.5b, sont réparties selon les usages de la voiture : courte distance pour les villes du centre (globalement), longue distance pour les villes de la périphérie. L'« hyper centre » de Bordeaux,

7. Zone parmi les 19 zones présentées dans la section I.1.a de cette partie.

8. Il se trouve que l'Enquête Ménages Déplacements de 2009 – aussi appelée EMD – était bien plus exhaustive et précise que l'Enquête Déplacements Allégée de 2017 (*sic*) – aussi appelée EDA – dont les résultats n'ont en outre pas été publiés avant février 2019. Nous avons donc commencé par paramétrer le modèle en traitant les données de l'EMD. À la publication de l'EDA, les informations qui pouvaient l'être de façon cohérente ont été mises à jour. Certains périmètres ont été modifiés, bien qu'ils aient tenté de conserver les mêmes découpages thématiques et spatiaux, et nous ont conduit à privilégier les informations de l'EMD de 2017.



(A) Courte distance (B) Longue distance

FIGURE 3.5 – Carte des rapports courte et longue distances sur population pour les 19 zones de modélisation.

correspondant en partie au quartier historique, a dans les deux cas des valeurs faibles, témoignant du fait que les habitants utilisent moins la voiture que dans les autres zones.

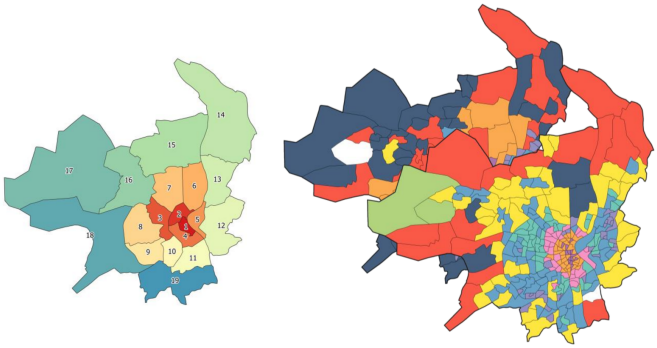


FIGURE 3.6 – Résumé de la méthodologie : nous disposons l'échelle de 19 zones.

Nous disposons donc maintenant d'une structure spatiale, temporelle, et d'un problème d'optimisation piloté par la demande finale dans lequel insérer la description de notre modèle urbain (voir figure 3.6).

I.2. De nouvelles façons de décrire les secteurs au sein de TIMES-URBAN

TIMES-URBAN est constitué de deux secteurs : le secteur urbain et le secteur des transports. Ce dernier est attaché au secteur urbain par le besoin de sol pour les infrastructures de mobilité. Nous allons décrire dans la présente section le fonctionnement de ces deux secteurs, en nous intéressant tout d'abord au secteur urbain (dans la partie I.2.a) et à la mise en œuvre des archétypes décrits dans le

chapitre 2 au sein de cette forme originale de modèle TIMES [9], avant de décrire le secteur des transports (voir partie I.2.b).

I.2.a. Un secteur urbain centré sur l'allocation des sols

Le secteur urbain de TIMES-URBAN est la principale contribution de ce travail de thèse à la discipline des modèles *bottom-up* d'optimisation de la famille MARKAL/TIMES. Il s'articule autour de deux familles de technologies principales, les archétypes de formes urbaines tout d'abord (voir paragraphe I.2.a.1), les archétypes de bâtiments ensuite (voir paragraphe I.2.a.2). Chaque archétype, qu'il soit de l'une ou l'autre des familles, correspond en fait à une technologie qui est insérée dans le graphe des flux de commodités. Nous procédons ici dans la logique de construction du secteur ou du planificateur, c'est-à-dire en partant du sol non assigné pour remonter jusqu'aux bâtiments.

La forme urbaine comme allocation des sols

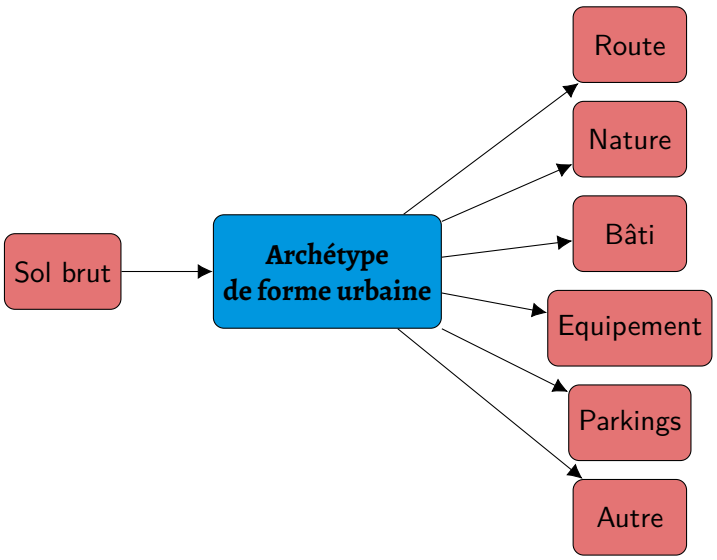


FIGURE 3.7 – Graphe des process de formes urbaines.

La commodité principale d'entrée du secteur urbain est la superficie disponible dans la métropole de Bordeaux. Cette surface est ensuite répartie par des archétypes de formes urbaines entre plusieurs terrains tel que présenté dans la figure 3.7 :

- du terrain pour les **routes**, selon le type de route (*autoroute*, *nationale*, *départementale*, *autres*) ;
- du terrain pour les **espaces naturels** ;

9. On pourra noter que la partie consacré au secteur urbain est plus légère que celle décrivant le secteur du transport : cela est simplement lié au fait que l'innovation majeure dans la description des objets urbains que sont les formes urbaines et les bâtiments n'est pas tant sur les outils de modélisation déployés (qui utilisent classiquement le système de technologies et de commodités) que sur l'intégration d'archétypes statistiques et l'utilisation de tels outils dans la manipulation de terrain urbain. *A contrario*, le secteur du transport demande plus de travail et intègre les dernières avancées proposées par TATTINI (2018) et DALY et al. (2014) pour une modélisation de la mobilité plus pertinente au regard des problématiques urbaines et des objectifs de TIMES-URBAN [DALY et al. (2014) et TATTINI (2018)].

- du terrain pour bâtir du **résidentiel** ou des **locaux d'activités** ;
- du terrain pour des **équipements publics** ;
- du terrain pour des **parkings** ;
- du terrain considéré comme **autre**, c'est-à-dire qui n'est rangé dans aucune des catégories précédentes. Ce type de terrain peut correspondre à plusieurs occupations des sols, de la zone d'activité économique qui présente de larges surfaces artificialisées, des prairies non répertoriées comme espaces naturels, des zones spécifiques comme une base militaire ou un aéroport. La figure 3.8 affiche les pourcentages pour chacun des IRIS de la métropole selon leur archétype. Des *process* supplémentaires permettent de convertir ces terrains en terrain utilisable pour des routes, du bâti ou des espaces naturels [10].

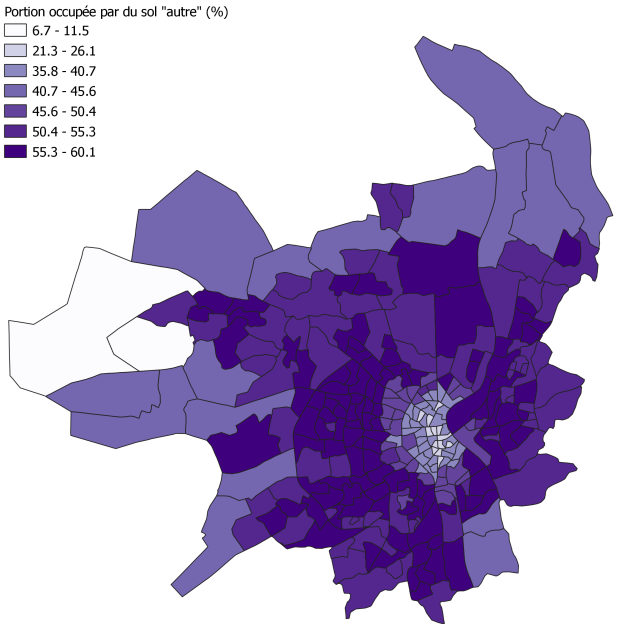


FIGURE 3.8 – Proportion pour chaque IRIS de sol catégorisé comme « autre » selon le clustering et la définition d'archétypes réalisée au chapitre précédent. Chaque archétype de forme urbaine a en effet une partie de son territoire qui n'est occupé par aucune des nomenclatures définies précédemment (routes, espaces naturels, bâtiments, équipements publics, parkings) : cette superficie est considérée comme « *autre* » et peut être convertie par TIMES-URBAN dans les nomenclatures.

La particularité de tels *process* est que lorsqu'une unité de commodité est consommée en entrée, une unité de commodité est produite en sortie : en d'autres termes, lorsqu'un km² de sol est utilisé, un km² doit être sorti puisqu'aucun terrain ne disparaît dans la métropole. Les unités d'entrée et de sortie sont donc des km² et l'efficacité des process est de 1.

Cette première étape de représentation des archétypes de formes urbaines est donc assez comparable au procédé décrit dans un Plan Local d'Urbanisme où

10. L'existence de cette commodité de sol « *autre* » et de technologies fictives internes qui permettent sa conversion en d'autres formes est une première marque de flexibilité offerte au modèle dans son utilisation des archétypes. Ceux-ci peuvent paraître en effet restrictifs : limiter à 10 formes urbaines et à 10 bâtiments la description d'une métropole de près de 750 000 bâtiments et 280 quartiers est forcément réducteur et rigide, rigidité que l'on peut contrebalancer par cette forme d'élasticité – certes limitée – mais permettant de conserver tout de même la structure initiale et de suivre la définition des archétypes.

certaines zones sont dédiées à un usage spécifique (ouvrant la possibilité à l'urbanisation ou à la transformation par exemple). Le modèle choisit la ou les formes les plus efficaces en fonction des coûts mais aussi selon ce que l'archétype permet comme organisation des étapes suivantes [11].

Le bâtiment comme fournisseur de logements et de locaux

Les bâtiments ont été séparés en deux catégories : les **logements et locaux d'activités**, et les **équipements publics**. Ces derniers sont restreints ici aux écoles maternelles et primaires car ceux-ci sont un sujet capital lors du développement de nouveaux quartiers : ils représentent en effet des investissements importants et nécessaires. Se posent donc au cours du processus d'aménagement les questions de la possibilité d'ouvrir de nouvelles classes dans les écoles existantes ou du besoin de construire un nouvel édifice pour absorber les demandes créées par l'ajout de logement. Les autres bâtiments publics (locaux sportifs, édifices culturels, lieux d'enseignement secondaire ou supérieur, etc.) sont également capitaux pour l'attractivité d'un lieu mais leur développement arrive souvent dans un deuxième temps [12], sauf dans le cas où un projet d'aménagement s'organise autour du besoin d'un nouvel équipement par exemple [13].

Les logements et les locaux d'activités ont été regroupés dans les mêmes technologies pour rendre compte partiellement de la *mixité d'usage*. Ce principe consiste à intégrer, dans un seul bâtiment, des bureaux, des commerces, des espaces d'activité économique, des espaces de loisirs, des logements, voire des équipements (piscine, crèche, école…), etc. Loin d'être une véritable révolution théorique, on retrouve en fait déjà de la mixité dans presque toutes les villes, avec l'établissement de magasins au rez-de-chaussée et de logements dans les étages, version simplifiée de la mixité d'usage [14]. Ces formes peuvent se trouver dans les villages (boulanger au-dessus de sa boulangerie, par exemple) comme dans les grandes métropoles (certains appartements pouvant être presque indifféremment utilisés, en pratique, comme logements ou bureaux, par exemple pour des *start-ups*, des cabinets d'avocats ou de médecins [15]…). Cette transformation est en partie liée à la tertiarisation de pans entiers de l'économie qui permet dans beaucoup de métiers de se passer des machines et des grands espaces naturellement nécessaires aux activités primaires et secondaires, et donne donc la possibilité d'investir des

11. D'ailleurs, quand on regarde le procédé, puisque le modèle est piloté par la demande, la logique de description des mécanismes à l'œuvre voudrait plutôt qu'on parte de la demande de logements pour en effectuer la lecture. Cela permettrait de voir ce qu'implique une augmentation de la population en termes de nouveaux bâtiments ou d'extensions avant de s'intéresser à l'impact que cela peut avoir sur les sols et où trouver les terrains nécessaires. Cela recoupe alors cette fameuse question du foncier qui revient si souvent dans les problématiques urbaines et à laquelle font face les urbanistes dans leurs projets mais donne aussi une autre lecture de l'exercice d'aménagement.

12. Leur intégration dans TIMES-URBAN n'est pas nécessaire au bon fonctionnement du modèle et la question de ces équipements est secondaire dans l'occupation des sols face aux enjeux de logements et d'accueil de locaux d'entreprises.

13. Cela a pu être le cas dans les appels à projets « Réinventons » pour Paris ou d'autres villes, par exemple autour d'un cinéma [BESSE (2016) et DUFFÉ (2017)].

14. Qualifiée de frileuse par certains [DEGIOANNI et ALBERT (2012)] voire subie par les commerçants qui ne bénéficient alors pas de conditions optimales, la priorité étant donnée aux logements. Ceci peut expliquer en partie le retrait de nombreux commerçants des centres-villes [DUMARTIN (2019)].

15. Il faut toutefois rappeler qu'il existe des impératifs juridiques au changement de *destination* et d'*usage* d'un appartement, que ce soit pour en faire des bureaux ou l'inverse [BERCY INFOS (2020)].

appartements [16].

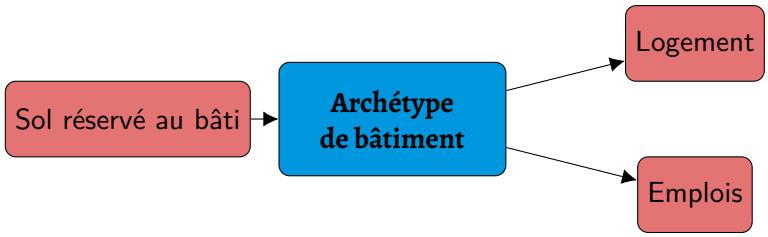


FIGURE 3.9 – Graphe des process de bâtiments.

La figure 3.9 donne le graphe des flux des process de bâtiments. Les données d'entrée sont en km² et les données de sortie sont en emplois et en habitants (pour les logements).

Autres archétypes possibles

Il est également possible d'ajouter dans TIMES-URBAN de *nouvelles formes urbaines*, qui proposent par exemple des parties souterraines, plus de végétation, moins de routes et plus d'espaces piétons, etc., ou de *nouveaux bâtiments*. Ces archétypes imaginaires peuvent être le support de tests de propositions d'aménagement innovantes ou de projets particuliers.

Un exemple pertinent pourrait être celui du projet d'ANMA pour le quartier de la Jallère [17]. Un travail important y a été fait au cours des années sur la continuité des trames vertes et bleues afin de s'assurer de minimiser l'impact sur les écosystèmes locaux, en tentant de préserver l'existant ce qui reste mieux que compenser [18] [LATUNE et al. (2019)]. La transposition d'un tel projet dans le modèle serait une perspective intéressante puisqu'il s'agit de proposer de nouvelles formes urbaines qui pourraient être développées dans le futur même si elles sont peu ou pas présentes actuellement.

16. Un autre cas montrant l'ancienneté de ce procédé est le cabinet médical qui peut être situé dans un appartement au milieu d'une tour d'immeubles, dans une maison individuelle partagée ou utilisée également comme logement par le médecin.

17. Présenté dans la section I.1.b du chapitre 2, p. 92.

18. Dans de tels projets, l'impact sur la nature est encadré et donne lieu à plusieurs possibilités. Le projet doit tenter, autant que faire se peut, de préserver l'existant et de montrer qu'il ne perturbe pas qualitativement et quantitativement les espèces présentes. Pour cela, le code de l'environnement, en France, stipule depuis plusieurs décennies que le principe d'ERC, c'est-à-dire *éviter, réduire et compenser*, doit être appliqué [Article L110-1 (2003)]. Plus précisément, les projets d'infrastructure ou d'aménagement doivent d'abord chercher à éviter leur impact, puis éventuellement le réduire, et en dernier recours, pour les résidus, compenser les dommages occasionnés sur la faune et la flore par la mise en place d'autres zones propices à la vie animale et végétale. Il va sans dire que de telles mesures et les études proposant des solutions en adéquation avec ce principe sont souvent discutées au sein d'un projet et que le choix de l'une ou de l'autre option reste politique. Néanmoins, le principe de l'ERC n'est finalement que peu respecté dans sa théorie (mettre l'accent sur l'évitement, puis la réduction et enfin la compensation) [LONGEOT et DANTEC (2017)]. En outre, ces mesures ne sont pas toujours appliquées jusqu'au bout [ASTIER (2019)] et n'ont pas forcément l'efficacité escomptée : dans une étude sur les approches de compensation mises en œuvre suite à la construction de la Ligne Grande Vitesse entre Tours et Bordeaux, LATUNE et al. (2019) concluent ainsi que, « *quel que soit le système choisi, les attendus en termes [non perte nette] de biodiversité ne sont pas atteints.* »

I.2.b. L'ajout des infrastructures de transport et du temps dans les choix modaux

La question des transports dans notre modèle long terme est délicate. Comme nous l'avons vu précédemment dans la section V.2.b dressant un rapide portrait des approches déployées pour l'analyse de la ville sous l'angle des transports et de l'aménagement, il existe des modèles de simulation des transports et des modèles intégrant les enjeux utilisation des sols et mobilité (modèles LUTI). Ces différentes approches s'intéressent plus souvent à la simulation des conditions de trafic [Robinson et al. (2009)] ou aux interactions entre la mobilité individuelle et les choix d'habitat [Acheampong et Silva (2015) et Tannier et al. (2016b)], domaines connexes au nôtre mais qui ne sont pas directement capitaux dans l'établissement de cette méthodologie. En outre, ces modèles sont généralement complexes à intégrer dans une autre approche [19]. Très peu d'études évaluent l'utilisation moyenne de surface de route par les voitures et autres moyens de transports. De plus, il est question, lorsque l'on traite de la demande en transport d'une population, de passagers véhicules km, c'est-à-dire d'un total de distance faite par l'ensemble des passagers et de leurs véhicules, en prenant en compte le fait que les passagers peuvent être plusieurs par véhicule. Or, les données que nous manipulons jusque-là sont purement surfaciques : une approche originale nous a permis de créer les technologies correspondants.

Cette problématique de l'intégration détaillée des transports dans un modèle TIMES est récente : la notion de budget temps a été ajoutée aux consommations des process de mobilité pour parfaire l'étude du changement modal [Daly et al. (2014)] mais n'est pas systématiquement incluse dans les études [Dodds et McDowall (2014)] ; les travaux de thèse de Tattini (2018) ont marqué une avancée particulièrement importante et originale dans la représentation du secteur du transport avec la prise en compte des infrastructures dans le système énergétique de référence. Ces infrastructures ne sont pas concrètement modélisées mais considérées comme des commodités auxquelles le modèle a accès, commodités adjointes de coûts et de contraintes pour s'assurer de leur réalisme [Tattini (2018) et Tattini et al. (2018)].

Ainsi, une des nouveautés de ce modèle, outre l'approche spatiale et urbaine, est le lien réalisé entre la gestion de la surface du territoire et la modélisation des infrastructures et du temps dans le secteur du transport. L'idée simple derrière l'intégration du coût temporel d'un déplacement s'inspire notamment du principe de capacités développé par Hägerstrand (1970) en proposant un budget temps par habitant (dont la valeur est extraite des enquêtes sur la ville de Bordeaux [CUB et al. (2009)]) [Wegener et Fuerst (2004)].

Représentation des infrastructures dans le modèle

Nous commencerons d'abord par décrire l'intégration des infrastructures dans Times-Urban.

19. Bien que la collaboration entre le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED), et l'UMR Centre national de recherches météorologiques du CNRS et de Météo France, soient un exemple et une grande réussite [Houet et al. (2016) et Masson et al. (2014)].

Schéma général du secteur des infrastructures

Le schéma général est le suivant : le sol (surfacique) est occupé par des infrastructures (surfaciques) qui peuvent être utilisées comme autoroute, route, voie de bus, piste cyclable (linéaires) sur lesquelles circulent les voitures, bus et autres (moyens de locomotions). Le graphique 3.10 donne une représentation de ce principe en *trois couches*.

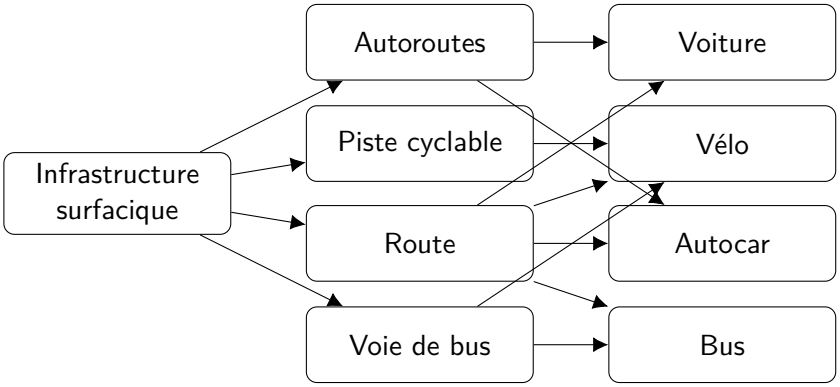


FIGURE 3.10 – Schéma simplifié de fonctionnement des technologies du secteur des transports de TIMES-URBAN : simplifié au sens où TIMES-URBAN intègre concrètement plusieurs types différents d'infrastructures (les autoroutes n'ayant pas la même base surfacique qu'une route communale par exemple) ; et que d'autres types de routes – nationale, départementale, communale – incluses dans le modèle ne sont pas représentées ici pour ne pas surcharger le graphe.

Cette décomposition en deux éléments distincts, la base d'infrastructure (en surface) et l'infrastructure (en linéaire), a été choisie car la durée de vie de la structure sous-jacente des routes (de 30 à 40 ans pour la structure voire 100 ans pour les ouvrages d'art correctement entretenus) est souvent bien plus élevée que celle du recouvrement qui est plutôt de l'ordre de la dizaine d'années (jusqu'à 25 ans selon les cas) [NEMRY et DEMIREL (2012)]. Si l'on regarde la chaîne complète pour un mode de déplacement, l'autoroute par exemple, on a donc le graphique 3.11.

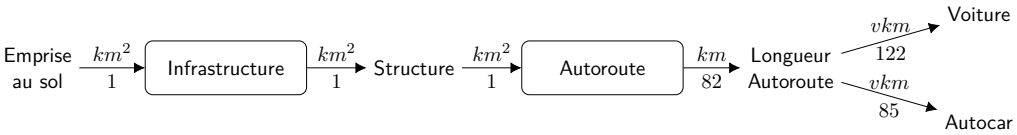


FIGURE 3.11 – Schéma d'une infrastructure de mobilité (ici l'*autoroute*) avec indication des efficacités et des unités utilisées.

Paramètres des process d'infrastructure

Pour construire le modèle TIMES-URBAN, nous proposons de définir une disponibilité ou efficacité annuelle des infrastructures : que représente-t-elle ? Il est possible de voir l'efficacité d'une route par le nombre de véhicules qui peuvent passer par an sur une portion. Il existe alors deux façons de caractériser une infrastructure, par l'aire (en m^2) ou par la longueur (en m). Étant donné le fait que nous avons choisi de nous intéresser à l'utilisation des sols et que c'est le facteur limitant, il est plus cohérent d'utiliser une approche surfacique en sortie des formes urbaines précédemment définies. Néanmoins, les déplacements individuels (la demande finale) sont évalués en distance parcourue tel que mentionné

plus haut (en passagers véhicules km), ce qui nous conduit à utiliser un *process* intermédiaire fictif pour faire la transition entre surface et longueur d'infrastructure.

On commence donc par la formule suivante :

$$\forall i \in I, a^i = \frac{n^i}{l^i} \tag{3.2}$$

avec I l'ensemble des types d'infrastructures, $a^i \in \mathbb{R}$ le facteur de disponibilité recherché, $n^i \in \mathbb{N}$ le nombre total de véhicules passant sur l'infrastructure et l^i la longueur de l'infrastructure considérée.

Or chaque infrastructure peut fournir à plusieurs modes différents une capacité de trajet (une route peut être empruntée par des voitures, des bus, des vélos…). On a donc :

$$\forall i \in I, n^i = \sum_{m \in M} n_m \delta^i_m \tag{3.3}$$

avec M l'ensemble des modes de transport, $\delta^i_m \in \{0, 1\}$ l'utilisation ou non de l'infrastructure i par les véhicules du mode m et $n_m \in \mathbb{N}$ le nombre de véhicules du mode m. Pour expliciter la formule 3.3, prenons les exemples suivants : les vélos vont sur les routes départementales mais pas sur les autoroutes, les voitures vont sur les routes départementales mais pas sur les pistes cyclables. Ainsi on aura dans ce cas :

$$\begin{array}{lll} \delta^{\text{depar}}_{\text{velo}} = 1 & & \delta^{\text{depar}}_{\text{voit}} = 1 \\ \delta^{\text{autor}}_{\text{velo}} = 0 & et & \delta^{\text{autor}}_{\text{voit}} = 1 \\ \delta^{\text{piste}}_{\text{velo}} = 1 & & \delta^{\text{piste}}_{\text{voit}} = 0 \end{array}$$

Mode	Départementale	Nationale	Autre route	Autoroute	Voie de bus	Piste cyclable
Vélo	1	0	1	0	1	1
Bus	1	1	1	1	1	0
Car	1	1	1	1	0	0
Voiture	1	1	1	1	0	0

TABLEAU 3.3 – Utilisation par les différents moyens de transport (en ligne) des infrastructures (en colonne). L'ajout de données adaptées sur l'utilisation des infrastructures par les moyens de locomotion permettrait de passer d'une valeur binaire à une représentation probabiliste.

Le tableau 3.3 présente l'ensemble de ces compatibilités pour tous les modes. Les routes d'importance supérieure à la départementale sont interdites aux vélos, de même que les couloirs de bus et les pistes cyclables le sont pour les voitures et les autocars.

Il faut également définir une efficacité propre à chaque véhicule : celle-ci est calculée à partir de la vitesse moyenne des modes [20] [TATTINI et al. (2018)]. Le tableau 3.4 présente les vitesses moyennes dans la CUB d'après l'étude de 2009 [CUB et al. (2009)]. On obtient donc une efficacité propre a^i_m à chaque mode de transport et à chaque commodité représentant une infrastructure. On remplace a_i par a^i_m dans l'équation 3.2 ce qui donne la nouvelle formule suivante :

$$\forall i \in I, \forall m \in M, a^i_m = \frac{n^i_m}{l^i} = \frac{n_m \delta^i_m}{l^i} \tag{3.4}$$

20. Par exemple, on peut faire passer par an « plus » de voitures sur une autoroute que d'autobus.

Mode	Vitesse moyenne en km/h *conventionnel*	*électrique*
Voiture	26,5	26,5
Transports collectifs urbains	12,7	
Autre TC	19,1	
Vélo	14,1	16
Deux roues motorisé	26,6	
Marche	4	
Autre	26,6	
Tous modes	20,4	

TABLEAU 3.4 – Vitesses moyennes des moyens de locomotion [CUB et al. (2009)].

Il nous faut enfin introduire la répartition de l'utilisation d'une voirie selon les modes [21]. Ce choix doit en fait être fait optimalement et on laisse cette répartition *a priori* libre : en effet, cet indicateur résume le choix d'usage d'une infrastructure par certains modes, choix qui reste également influencé plus largement par les autres secteurs et contraintes (sur le budget temps par exemple). De plus, une route permettant de faire passer *plus* de vélos, il semble cohérent que, si le tout-vélo est plus optimal, il soit possible de construire des routes où roulent uniquement des vélos [22]. Des contraintes pourraient être implémentées en supplément si des politiques, des mesures ou d'autres changements venaient à contredire cette réflexion.

Pour conclure sur cette première phase de représentation du secteur du transport, nous avons considéré l'utilisation de chaque type d'infrastructure par les moyens de transport disponibles pour leur assigner une efficacité purement statistique. Dans un deuxième temps, nous proposons de caractériser les modes de transport.

Paramètres des process de mobilité

Une fois les infrastructures établies, nous décrivons ici l'intégration des technologies de mobilité, en nous concentrant sur le lien fait avec les infrastructures et avec la notion de budget temps [DALY et al. (2014) et TATTINI et al. (2018)].

Autour de l'infrastructure

Le moyen de transport « consomme » – au sens d'utilise chaque année – une partie des infrastructures. Une première réflexion donne donc la formule suivante pour l'efficacité d'un process de mobilité relativement à l'infrastructure :

$$\forall m \in M, \forall i \in I, r^i_m = \frac{n^i_m \bar{d}^i{}_m}{o_m} \frac{1}{l^i_{tot}} \tag{3.5}$$

avec, pour une infrastructure $i \in I$ et un mode $m \in M$, o_m l'occupation (en nombre de passagers) du mode de transport, n^i_m le nombre de trajets faits par

21. Cette répartition est représentée par le paramètre `Share` dans TIMES, correspondant à la décomposition des commodités de sortie possibles.

22. Et ce n'est même pas un exemple imaginaire : la rue de Rivoli à Paris a ainsi été temporairement réservée aux piétons, bus et vélos à l'occasion du confinement puis déconfinement du premier semestre de l'année 2020 [GAIRAUD (2020) et REY-SAHIN (2020)].

ce mode sur cette infrastructure, $\bar{d^i}_m$ la distance moyenne des trajets et l^i_{tot} la longueur totale de cette infrastructure.

Cela revient à regarder le rapport entre la distance réelle parcourue sur l'infrastructure par le mode (la division par le nombre de personnes dans le véhicule permet d'obtenir la distance réelle et non la distance totale en passagers-km) et la longueur d'infrastructure, donnant alors le déplacement moyen pour le véhicule par km de route, soit l'efficacité d'un km de la-dite infrastructure.

Notons d^i_m la distance totale parcourue sur une infrastructure i par un mode m, définie par :

$$\forall m \in M, \forall i \in I, d^i_m = n^i_m \bar{d^i}_m \tag{3.6}$$

On a alors une forme plus simple de l'équation 3.5 :

$$\forall m \in M, \forall i \in I, r^i_m = \frac{d^i_m}{o_m} \frac{1}{l^i_{tot}} \tag{3.7}$$

La valeur de d^i_m n'est pas toujours pas statistiquement accessible directement (il faudrait savoir, par exemple, combien de kilomètres sont parcourus par des vélos sur les pistes cyclables, par des voitures sur autoroute, nationale…) mais la valeur d_m du nombre de kilomètres parcourus par un mode spécifique l'est (voir tableau 3.5). Elle peut être liée à la distance par infrastructure d^i_m ainsi :

$$\forall m \in M, d_m = \sum_{i \in I} d^i_m \tag{3.8}$$

	Voiture	**TC urbains**	**Autre TC**	**Vélo**	**Marche**
Distance annuelle (km)	13 088 275,2	1 704 192	304 232	380 322,5	29 566,8
Taux d'occupation (nombre)	1,55	16,004	16,004	1	1

TABLEAU 3.5 – Valeurs de d_m et o_m d'après les résultats des enquêtes ménages-déplacements sur la métropole bordelaise [BORDEAUX MÉTROPOLE (2019) et CUB et al. (2009)].

On peut alors chercher des clés de désagrégation pour l'estimation de d^i_m en fonction de d_m en raisonnant de différentes manières. Nous proposons de regarder quelle est la distribution des distances d'infrastructures utilisables par le mode, c'est-à-dire quelles sont les routes accessibles par un certain type de véhicule et comment leurs longueurs se répartissent proportionnellement. Ainsi, si un mode $m \in M$ a accès à x km et y km de deux infrastructures i et j, on aurait comme clés $\frac{x}{x+y}$ et $\frac{y}{x+y}$. Cela revient à approcher d^i_m par $\hat{d^i}_m$ définie par la formule suivante :

$$\forall m \in M, \forall i \in I, d^i_m \approx \hat{d^i}_m = \frac{l^i_{tot}}{\sum_{j \in I} \delta^j_m l^j_{tot}} d_m \tag{3.9}$$

avec $\delta^j_m \in \{0, 1\}$ l'utilisation ou non de l'infrastructure $j \in I$ par le mode $m \in M$ (présentée précédemment).

On a donc la formule finale, qui ne dépend plus de l'infrastructure [23] et dont les

23. En effet, ce qui fait dépendre de l'infrastructure est la prise en compte de vitesses variables

valeurs calculées sont disponibles dans le tableau 3.6 :

$$\forall m \in M, \forall i \in I, r^i_m = \frac{\hat{d^i}_m}{o_m} \frac{1}{l^i_{tot}} = \frac{d_m}{o_m \sum_{j \in I} \delta^j_m l^j_{tot}} \tag{3.10}$$

Infrastructure	Voiture	TC urbains	Autre TC	Vélo
Autoroutes	46 778,8029	482,9693	105,3112	0,0000
Départementales	46 778,8029	482,9693	105,3112	1 170,5221
Nationales	46 778,8029	482,9693	105,3112	0,0000
Pistes cyclables	0,0000	0,0000	0,0000	1 170,5221
Voies de bus	0,0000	482,9693	0,0000	1 170,5221

TABLEAU 3.6 – Valeurs finales de l'estimation de l'efficacité par mode de transport en fonction de l'infrastructure utilisée (calcul d'après l'équation 3.10).

Autour du temps

Ce qui fait la différence principale de la consommation en temps des différents modes de transport est la vitesse moyenne à laquelle circule chaque véhicule. Pour prendre en compte cet effet, à chaque mode de déplacement est associée la consommation d'une ressource *temporelle* avec un rendement spécifique.

Ce rendement peut être calculé de la façon suivante :

$$\forall m \in M, r_m = \bar{v}_m \tag{3.11}$$

avec $\bar{v}_m$ la vitesse moyenne du mode m. Lorsqu'un process produit une commodité de sortie c_m, c'est-à-dire une distance, à partir d'une quantité de temps e_m, on a donc trivialement la formule qui suit :

$$c_m = e_m r_m = e_m \bar{v}_m \tag{3.12}$$

Appliquons cette équation au cas d'un bus transportant $o_{bus} = 10$ passagers, à la vitesse moyenne de $\bar{v}_{bus} = r_{bus} = 50$ km/h. Pour déplacer 10 personnes sur 100 km (c'est-à-dire produire 1 000 pkm), il faut 2 heures au bus, ce qui consomme $e_{bus} = 10 \times 2 = 20$ h dans le budget temps total et vérifie bien $c_{bus} = 20 \times 50 = 1\,000$ pkm. La notion d'occupation d'un moyen de transport ne doit pas entrer dans l'équation comme c'est généralement le cas dans ce genre d'approche [24] : le budget temps étant global, chaque passager souhaitant se déplacer consommera une portion du budget. Les paramètres des technologies dans TIMES-URBAN sont donc définies à partir des vitesses moyennes (affichées ci-dessus dans le tableau 3.4, p. 191).

selon le type de route. Or, comme le montre notre tableau 3.4 des vitesses des modes de locomotion, nous ne faisons pas cette différence ici, par manque de données. Ce serait une perspective intéressante [TATTINI (2018)].

24. On pourra par exemple se référer à la façon dont CAYLA (2011) détermine la valeur de ce « taux d'occupation » ou « taux de remplissage » des moyens de locomotion à partir de différentes enquêtes.

Perspectives d'amélioration du secteur du transport

Il est possible d'améliorer le système précédemment décrit. Pour cela, plusieurs pistes paraissent pertinentes : l'intégration des consommations d'énergie dans le modèle, en s'inspirant d'autres approches utilisant MARKAL/TIMES pour la France [Assoumou (2006)], ou plus spécifiquement pour la décarbonisation du secteur du transport [Bahn et al. (2013) et H. Zhang et al. (2016)] ou les changements de mobilité [Salvucci et al. (2018)] ; la considération des matériaux de construction dans la représentation des infrastructures (*cf.* section suivante pour plus de détails sur cette possibilité) ; l'ajout des ouvrages d'art ; l'inclusion d'autres facteurs liés à l'utilisation, au trafic et aux problèmes de congestion…

La prise en compte des matériaux de construction

À première vue, dans le cas où l'on souhaiterait ajouter la prise en compte du cycle de vie complet au modèle, faire porter ces coûts en matériaux aux seuls process dits de « *recouvrement* » (autoroute, piste cyclable, etc.) pourrait suffire. Ainsi, chaque technologie, chaque infrastructure aurait son propre coût en matériaux (cela pourrait, éventuellement, faciliter l'obtention des données) tout en gardant la logique présentée ci-dessus.

On peut remarquer que les opérations de recouvrement (remplacer le bitume) ont lieu bien plus fréquemment que les opérations de reconstruction ou de rénovation des structures (maintenance des ouvrages d'art, rénovation en profondeur du recouvrement). Comme chaque type d'infrastructure a deux technologies distinctes dans TIMES-Urban, cela facilite dans le cas de développements futurs la configuration d'une répartition des matériaux selon les opérations. Il est ainsi possible d'ajouter, dans un deuxième temps, les matériaux liés à une infrastructure en suivant une organisation comme celle proposée dans le graphe 3.12.

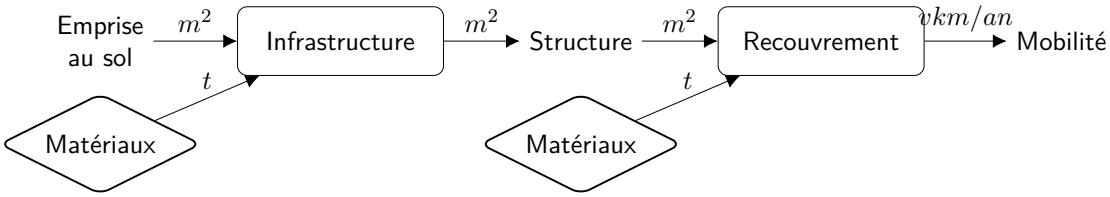


Figure 3.12 – Schéma d'un *process* d'*infrastructure* avec matériaux : ce graphe est une généralisation de celui présenté précédemment sur l'autoroute (voir figure 3.11, p. 189) à laquelle des sources de matériaux ont été ajoutées.

Cette question de l'intégration des matériaux dans le système de référence touche plus largement la problématique de l'utilisation de données d'analyses de cycles de vie dans de tels modèles. Cette question a déjà été plusieurs fois abordée [Blanco et al. (2020), Boubault et al. (2019), Kypreos et al. (2008b) et Roux et al. (2016)] et n'est pas l'objet ici bien que la notion d'empreinte d'une ville soit capitale [25] dans la lutte contre le changement climatique et la diminution de la consommation des milieux urbains.

25. L'idée d'une ville sortant largement de ses frontières physiques et administratives par l'importation de matériaux, d'énergie, et de biens manufacturés a déjà été discutée dans la section II.1.a.

I.2.c. Synthèse : une structure centrée sur le sol et son usage

Le schéma final du *système d'aménagement de référence* est résumé dans la figure 3.14. Le modèle est séparé en **deux secteurs** : les bâtiments et le transport. Le secteur des bâtiments est le secteur principal et voit le sol brut successivement transformé pour donner du sol constructible pour des logements ou locaux d'activités, pour des équipements publics, pour des routes, mais aussi pour des espaces naturels ou d'autres usages. Sur les sols réservés pour la construction de logements ou locaux d'activité, il existe plusieurs archétypes de bâtiments utilisables présentant des caractéristiques de mixité différentes mais également d'autres particularités (hauteur moyenne, distribution de l'efficacité énergétique [26]). Ces bâtiments produisent donc des emplois et des places de logements qui sont ensuite agrégés aux sorties des bâtiments publics pour répondre à la demande finale d'habitants. L'arbre des routes paraît un peu complexe mais comprend en fait plusieurs process pour les différents types de routes et de moyens de locomotion (qui consomment également du temps).

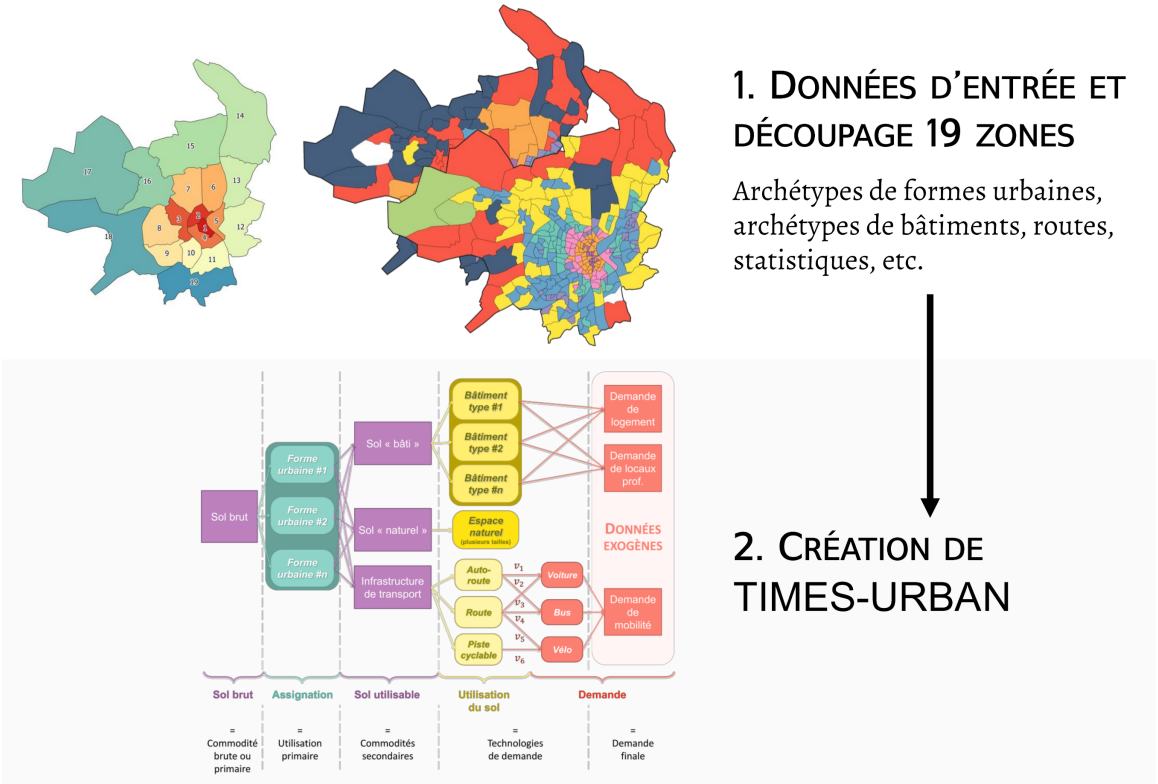


FIGURE 3.13 – Résumé de la méthodologie.

Nous avons maintenant décrit le cœur de TIMES-URBAN qui s'appuie sur notre construction d'archétypes et un système d'aménagement de référence original (voir figure 3.13). L'ajout de contraintes permet d'enrichir le problème d'optimisation ainsi formulé.

26. Voir annexe F, p. 423, pour plus de détails sur les caractéristiques des archétypes de bâtiments.

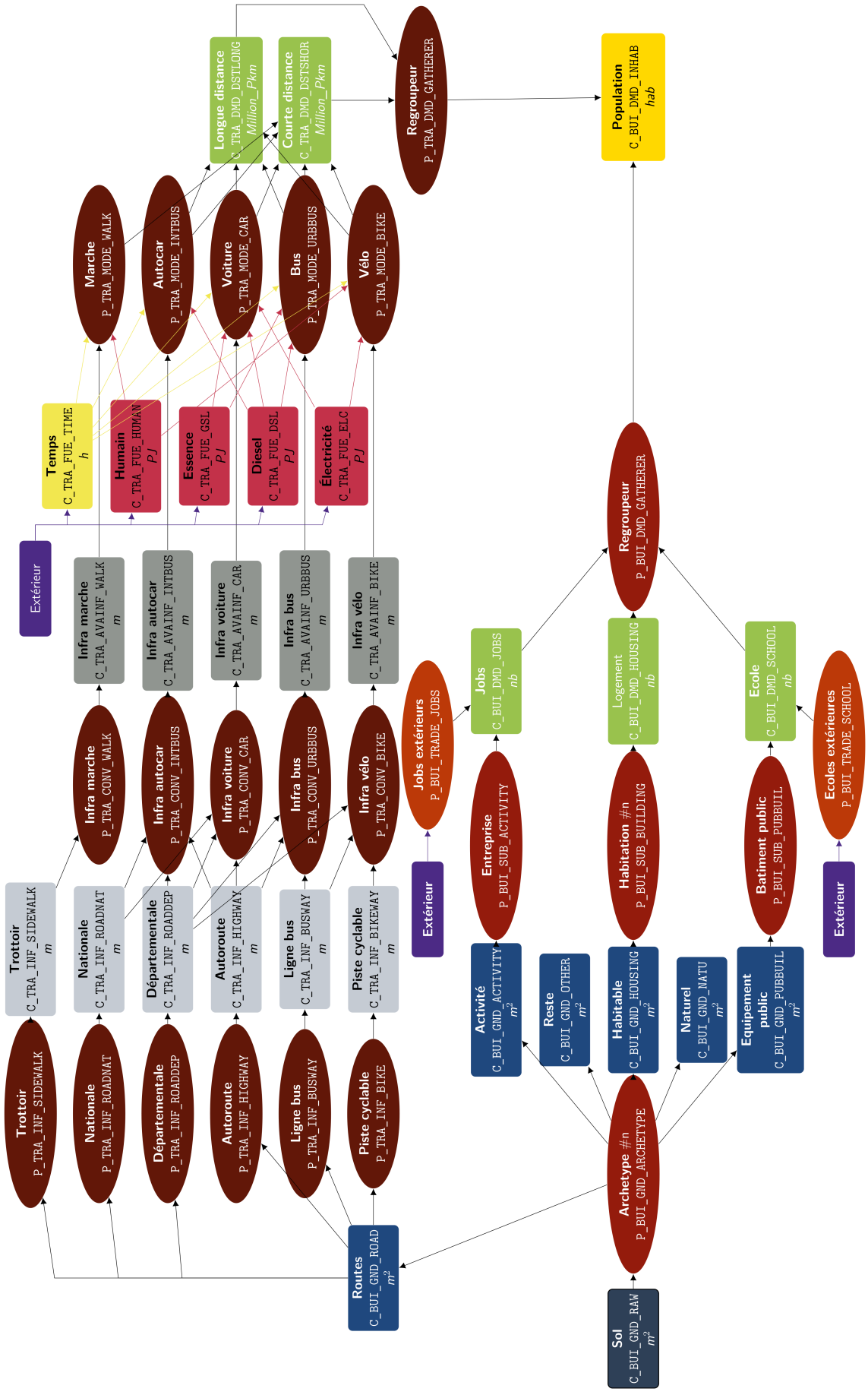


FIGURE 3.14 – Schéma d'aménagement de référence de TIMES-URBAN.

I.3. Une optimisation sous contraintes

Dans un problème d'optimisation, les contraintes permettent d'assurer plus de réalisme en restreignant l'espace admissible associé aux variables de décision et en traduisant des conditions de plausibilité supplémentaires. De la sorte, certaines contraintes décrites ci-dessous sont assez directes, comme par exemple, limiter l'aire totale utilisable (il n'est pas prévu que la Métropole de Bordeaux s'agrandisse même si cela pourrait être le sujet d'un scénario à part), éviter des investissements improbables (comme reconstruire des bâtiments historiques du XVIII^{ème} ou du XIX^{ème} siècle). D'autres contraintes sont quant à elles utilisées pour créer des scénarios et illustrer des problématiques d'urbanisme, comme par exemple limiter la hauteur des bâtiments dans certaines zones, concentrer les nouveaux changements autour des axes de transport, permettre la transformation de bâtiments de logements en bâtiments mixtes. Le tableau 3.7 présente et résume l'ensemble des contraintes activables que nous avons décrites dans TIMES-URBAN.

Contrainte	Type	Cible	Années	Zones
Paramètres généraux	*Technique*	*Toutes*	2015-2050	*Toutes*
Échanges d'emplois entre les différentes zones	*Technique*	*Autres*	2015-2050	*Toutes*
Contenu de l'année de référence	*Technologies*	*Toutes*	2014	*Toutes*
Nouvelles technologies	*Technologies*	*Toutes*	2015-2050	*Toutes*
Ajout d'un coût aux archétypes urbains (fonction de l'artificialisation)	*Technologies*	*Terrains*	2015-2050	*Toutes*
Ajout d'un coût par m² aux bâtiments	*Technologies*	*Bâtiments*	2015-2050	*Toutes*
Force chaque zone à garder le même ratio *a minima* d'espaces naturels au long des années	*Réalisme*	*Espaces verts*	2015-2050	*Toutes*
Force chaque zone à obtenir un ratio d'espaces naturels conforme aux recommandations de l'OMS [WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE (2016)]	*Réalisme*	*Espaces verts*	2015-2050	*Toutes*
Limitation des formes de bâtiments trop spécifiques (centre historique)	*Réalisme*	*Bâtiments*	2015-2050	*Toutes*
Limitation des formes urbaines trop spécifiques (base militaire)	*Réalisme*	*Terrains*	2015-2050	*Toutes*
Limitation de la construction de tours	*Réalisme*	*Bâtiments*	2015-2050	*Toutes*
Limitation de la transformation des bureaux vacants	*Réalisme*	*Bâtiments*	2015-2050	*Toutes*
Limitation de la surface totale	*Réalisme*	*Terrains*	2015-2050	*Toutes*
Priorité au développement autour des arrêts de bus et de tramway	*Cas d'usage*	*Terrains*	2015-2050	*Zones centrales*
Priorité au développement autour des arrêts de tramway	*Cas d'usage*	*Terrains*	2015-2050	*Zones centrales*

TABLEAU 3.7 – Table des contraintes imposées au modèle.

Parmi les contraintes rapidement listées dans le tableau 3.7, nous allons en expliciter quelques-unes : la limitation de la surface totale, l'ajout d'un coût aux archétypes urbains et par m² aux bâtiments, la limitation des formes urbaines et des bâtiments trop spécifiques (centre historique) et la limitation de la construction de tours. On pourra se référer à l'annexe H pour plus de précisions sur les méthodes concrètes de définition de contraintes dans le framework TIMES.

I.3.a. Limitation de la surface totale aux frontières administratives

La contrainte la plus simple à expliciter est peut-être tout simplement la limitation de la surface totale disponible. Pour cela, au vu de la structure définie dans la section précédente (*cf.* partie I et en particulier la section I.2.a.1), il suffit de contraindre le process (fictif) important la surface de base non attribuée. En effet, les process consommant de la surface ont toujours une efficacité de 1, c'est-à-dire qu'ils transforment 1 km² en 1 km², donc sans augmenter la surface totale. Limiter l'import initial de surface suffit donc à contraindre l'ensemble des superficies manipulées.

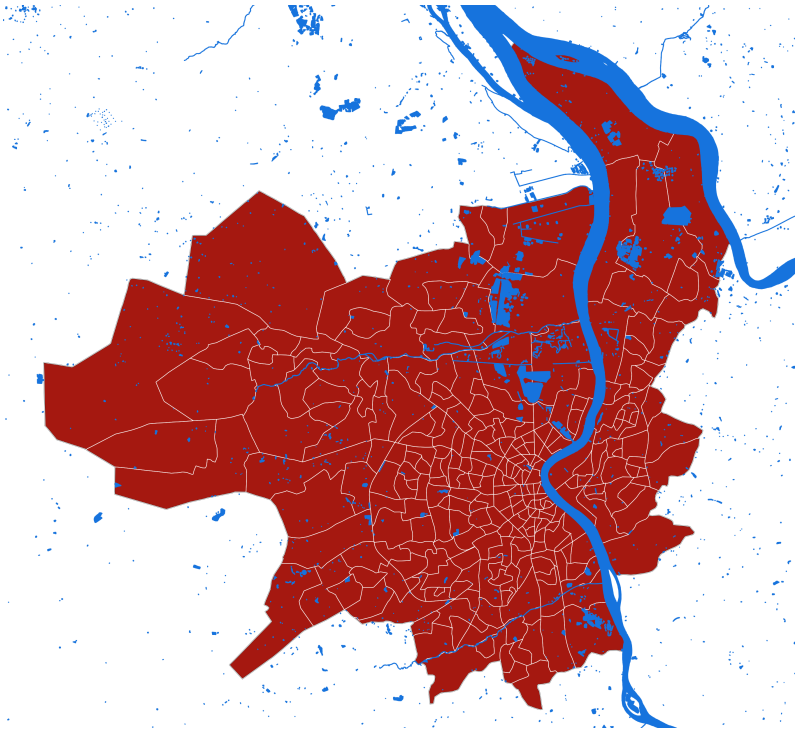


FIGURE 3.15 – Carte de la métropole de Bordeaux (découpage IRIS) et des surfaces d'eau disponibles dans la BDTOPO.

Pour calculer l'aire limite, nous avons utilisé le découpage officiel en IRIS de l'INSEE disponible dans les bases de données de l'IGN, IRIS dont sont retirées les surfaces d'eau [27] telles que présentées sur la carte 3.15. Une partie du territoire est en effet complètement inconstructible puisque recouverte d'eau (ou en tout cas inconstructible sans l'utilisation de techniques de construction spécifiques [28]).

27. À partir de la couche `SURFACE_EAU` de la BDTOPO de l'IGN.

28. Il pourrait être riche en enseignements d'intégrer les aires couvertes d'eau dans l'approche et de permettre de les utiliser en ajoutant un coût de conversion correspondant aux investissements de remblayage ou de retrait de l'eau, ou bien en n'autorisant que certains nouveaux archétypes de bâtiments construisibles sur de l'eau, par exemple sur pilotis.

Les IRIS sont ensuite fusionnés jusqu'à obtenir le territoire total : la métropole s'étend ainsi sur environ 543,03 km² (contre 576,85 km² en théorie).

I.3.b. Ajout d'un coût aux archétypes urbains (fonction de l'artificialisation) et par m² aux bâtiments

La notion de coût est capitale dans l'organisation des modèles issus des générateurs MARKAL/TIMES : la fonction objectif utilisée pour l'optimisation est en effet le coût actualisé de l'ensemble du système (*cf.* section I.1.c).

Plusieurs choix pour les formes urbaines

On peut envisager de mettre un coût différencié aux archétypes de *formes urbaines* selon plusieurs modalités :

- Un coût *uniforme* sur toutes les technologies ;
- Un coût *réel d'aménagement* : difficile à évaluer pour l'urbanisme, même si c'est un coût accessible pour les bâtiments en s'appuyant sur les chiffres de consommation du projet TABULA ou sur des chiffres officiels du ministère de la cohésion des territoires [de la COHÉSION DES TERRITOIRES (2016)] ;
- Un coût sur les *équipements publics* : en recensant les projets publics d'écoles et leurs investissements, ou encore en assignant, à travers la mobilité, un coût à une densité forte ou faible d'équipements ;
- Un coût sur les *changements d'occupation* ;
- Un coût *écologique* : faire payer l'artificialisation, faire payer la destruction ou le changement, faire payer la mobilité « moins propre » ;
- Un coût *fictif* représentant l'*artificialisation des sols* ou l'impact sur la température du choix d'archétype.

Dans un premier temps, nous avons choisi un coût *uniforme* – face à l'absence de données et d'estimations sur le coût d'une *forme urbaine* – pour l'ensemble des archétypes de formes urbaines. Le choix de tel ou tel investissement ne se fait alors que sur l'efficacité des possibilités qu'ils offrent dans le système d'aménagement : en effet, les archétypes de *formes urbaines* conservent le terrain (1 km² en sortie correspond à 1 km² en entrée) et une pondération ne peut pas être appliquée sur l'efficacité.

Utilisation des valeurs foncières pour les archétypes de bâtiments

La direction générale des finances publiques (DGFiP) a choisi, en 2019, d'ouvrir des informations sur les transactions immobilières (base de données appelée « *demandes de valeurs foncières* » ou DVF) [HOANG (2019)]. Il est donc possible de récupérer l'ensemble des valeurs disponibles sur les années 2014 à 2018. Le nombre de données étant relativement faible sur l'ensemble du territoire, il est préférable d'aggréger les cinq années et de considérer l'ensemble de la Gironde (et non pas seulement le territoire de la métropole de Bordeaux) pour obtenir suffisamment d'informations (450 000 valeurs environ pour une partie de la Gironde entourant la métropole [29]). Ces informations concernant les parcelles sont ensuite reliées

29. Cette zone correspond aux 277 IRIS de la métropole en ajoutant 259 IRIS dans une bande de 85 km est-ouest par 55 km nord-sud autour de la métropole en restant dans la Gironde.

aux IRIS en utilisant la BDPARCELLAIRE de l'IGN, permettant une aggrégation à l'échelle des IRIS en fonction du type de transaction et de l'objet concerné (une maison, une dépendance, ou un local industriel, commercial ou assimilé). En combinant ces données avec le clustering réalisé au chapitre 2, cela donne une valeur moyenne pour chaque archétype de bâtiment, résumées dans le tableau 3.8.

Il convient de noter la distinction entre € par km² de sol ou km² de plancher. De la même façon qu'on a différencié CES et COS [30] lors de la construction des archétypes (*cf.* section IV.3.a du chapitre 1, p. 64), on considère bien ici le coût par km² de sol bâti et non de plancher. Cela s'inscrit correctement dans la structure de notre modèle où la verticalité n'intervient finalement que très peu.

Archétype	**Coût (k€ / km²)**
Large bâtiment d'activité	2 163,06
Zones moyennement denses	2 597,26
Bâtiments de nouvelle banlieue périurbaine	2 950,51
Zones d'activités avec bureau	3 394,60
Bâtiments forte densité	2 829,28
Bâtiments de banlieue proche	2 096,17
ZA de Saint-Médard-en-Jalles	1 996,54
Logements de banlieue périurbaine	2 411,42
Logements anciens de banlieue périurbaine	2 469,64
Bâtiments du quartier historique	3 518,79

TABLEAU 3.8 – Table des coûts des archétypes de bâtiments.

Pour les autres éléments du modèle, à savoir le secteur du transport principalement, les coûts ont été fixés à partir de diverses études sur la mobilité et les infrastructures [CE DELFT et al. (2008), CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS et OCDE (2005) et NEMRY et DEMIREL (2012)] et des travaux ayant permis l'élaboration du modèle TIMES France [ASSOUMOU (2006), CAYLA (2011) et MILLOT (2019)].

I.3.c. Limitation des formes urbaines et des bâtiments trop spécifiques (centre historique)

La présente contrainte consiste à empêcher les nouveaux investissements dans ces formes urbaines et bâtiments trop spécifiques.

Certaines formes et bâtiments n'ont pas, a priori, vocation à être reproduits tels quels ou à changer prochainement (autrement que par des aménagements et rénovations spécifiques, passant par des demandes d'autorisations). C'est en particulier le cas des bâtiments inscrits ou classés parmi les monuments historiques qui font l'objet de règles particulières [31]. Au niveau des bâtiments, ce sont donc

30. En particulier depuis 2012 et une circulaire abolissant les SHON et SHOB – surfaces Hors Œuvre Nette et Brute [CRÉPON et MONTEILS (2012)].

31. La loi du 25 février 1943 instaure ainsi l'obligation d'un avis de l'Architecte des Bâtiments de France (ABF) sur toute demande d'autorisation de travaux à l'intérieur d'un périmètre de protection de 500 m de rayon autour des monuments historiques, classés ou inscrits. Les ABF peuvent dire « non », « oui » ou « oui sous certaines conditions ». La loi de 1943 a été modifiée par la loi « Solidarité et renouvellement urbains » (SRU) du 13 décembre 2000 qui instaure les *Périmètres de protection modifiés* (PPM) afin de limiter la protection aux abords des monuments historiques, c'est-à-dire

principalement ceux du centre historique qui sont concernés (c'est-à-dire l'archétype correspondant de bâtiment), ce qui correspond à environ 100 000 habitants.

En même temps, parmi les archétypes de formes urbaines identifiés, une autre forme semble très spécifique et ne concerne qu'un seul IRIS (que l'on peut voir comme un « *outlier* » ou *point aberrant*). L'utilisation de cet archétype particulier (puisqu'abritant une zone militaire) n'est pas pertinent pour notre modèle et a donc été également restreinte à la superficie occupée en 2014 (le modèle ne peut donc pas investir plus dans cet archétype en-dehors de la zone où se trouve la base militaire).

I.3.d. Limitation de la construction de tours

La question des tours est difficile à traiter. Les gratte-ciels sont ainsi vus par certains comme *la* solution [32] [BANQUE MONDIALE (2010a)].

Pour autant, l'acceptation sociale et environnementale de tels projets reste en question. Il est rare que les habitants soient ravis de l'installation de nouveaux bâtiments prenant une grand part du paysage et du champ visuel. En outre, l'efficacité énergétique par habitant de telle structure est douteuse [DU et al. (2016)], la consommation étant généralement plus importante dans les tours que dans des bâtiments moins hauts, même pour des bâtiments plus récents [CHOI et al. (2012) et GODOY-SHIMIZU et al. (2018)]. Enfin, certaines études ont montré un impact négatif de la vie dans des bâtiments de très grande taille (« *high-rise buildings* ») dans plusieurs dimensions relatives à la santé mentale (plus que physique), au social et à la vie familiale [GIFFORD (2007)], particulièrement sur des populations déjà à risque dans ces domaines [KEARNS et al. (2012)]. Cela peut conduire à une mauvaise acceptabilité sociale de telles tours par les populations, par exemple au Ghana [AGYEMANG et al. (2018)], même si cette question est finalement assez peu étudiée dans la littérature scientifique relative à l'acceptabilité sociale.

En outre, on assiste à une forme de *starisation* de l'architecture avec le besoin de produire des bâtiments (en général) toujours plus impressionnants et originaux pour attirer et donner plus de prestige à sa ville [MOLINA (2014)]. Cette recherche peut d'ailleurs être approchée de celle de l'effet *Bilbao* ou *Guggenheim* [33]. Par exemple, la ville de Bordeaux a peut-être cherché cet effet par l'installation de la Cité du Vin à l'entrée de la ville sur la Garonne [DEBRAY (2015)]. Bâtir des bâtiments très hauts (ou tours) n'est pas du tout automatiquement liée à la recherche d'un tel effet mais cela peut légitimement être lié, même dans une ville

uniquement aux espaces les plus intéressants au plan patrimonial. Les autorités vont donc voir concrètement sur le terrain l'impact positif ou négatif d'une modification demandée. Le PPM peut être proposé par l'ABF même si le maire ou tout autre acteur (une association par exemple) peuvent également en faire la demande. L'idée est que de nombreuses petites villes ont une église classé ou inscrite conduisant à un périmètre trop important pour la taille du centre de ville. Le PPM permet de diminuer le rayon mais de privilégier les avenues donnant un point de vue sur l'église par exemple ou les zones en vis-à-vis du bâtiment classé. Ainsi, les bâtiments proches mais qui ne sont pas dans les alentours directs – c'est-à-dire proches ou visibles – du bâtiment classé sont plus faciles à modifier. La loi ELAN, promulguée le 23 novembre 2018, change (entre autres) encore sensiblement le fonctionnement de demande de permis dans deux cas particuliers : l'ABF donnera un avis simplement consultatif lorsque le projet porte sur habitat indigne ou un cas d'implantation d'antenne de téléphonie mobile.

32. « *To save the planet build more skyscrapers.* » [BANQUE MONDIALE (2010a)]
33. Voir annexe A, p. 367, pour plus de détails sur cet effet.

qui n'en a pas nécessairement besoin comme Paris [Curtis (2008)].

La création de cette contrainte est donc issue de l'idée qu'on préfère éviter le recours à de tels bâtiments pour ces multiples raisons. Par conséquent, cette contrainte empêche les nouveaux investissements en tours.

II. Urban-Spatializer, un outil de projection spatiale

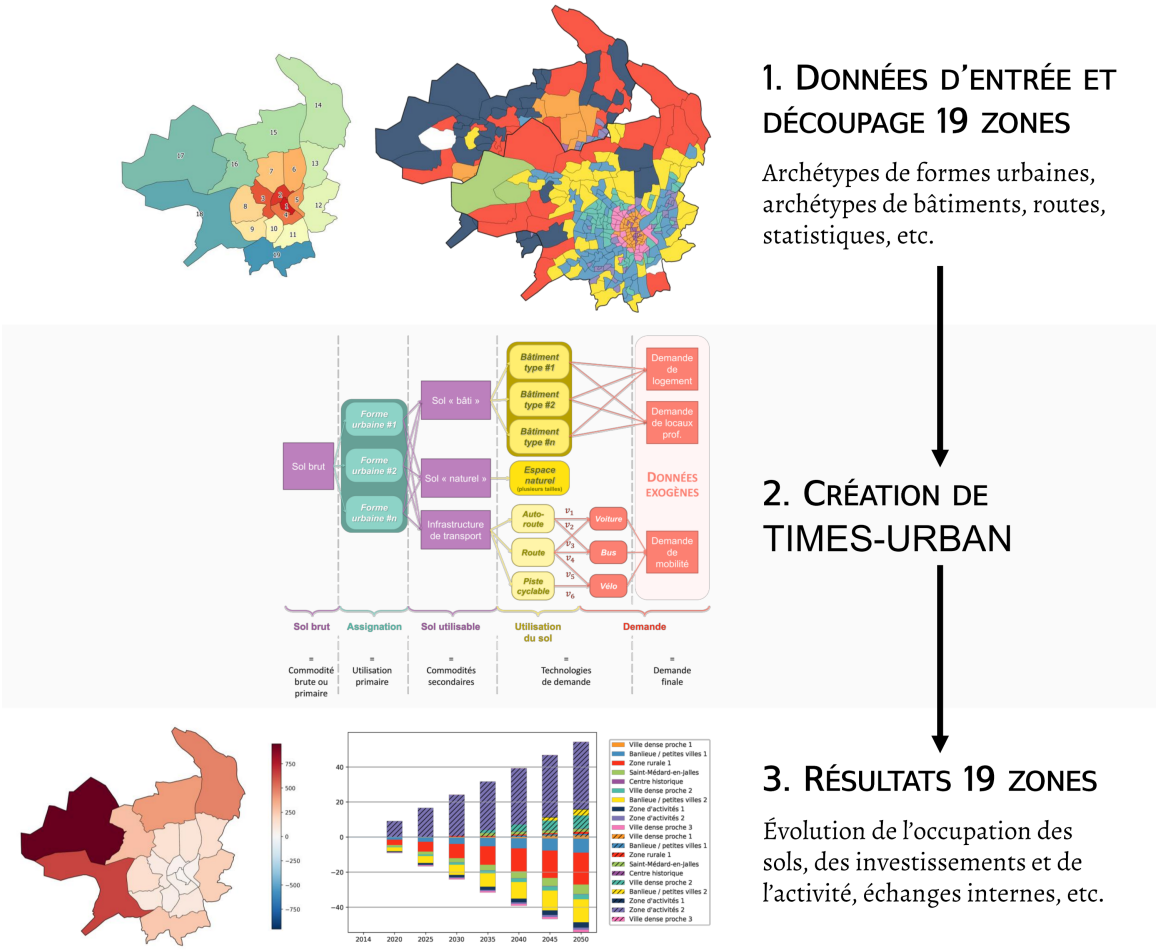


Figure 3.16 – Résumé de la méthodologie : nous avons maintenant un modèle Times-Urban qui fournit des résultats à l'échelle de 19 zones.

L'un des enjeux de la thèse est de parvenir à reconstruire spatialement une image du territoire en 2050 et d'en extraire un indicateur : aussi, une fois les résultats du modèle long-terme obtenus, nous proposons de les répartir géographiquement au sein de la métropole à l'aide d'un nouveau modèle, Urban-Spatializer. Celui-ci construit une carte des archétypes de formes urbaines et de bâtiments à partir des données produites par Times-Urban disponibles à l'échelle des 19 zones de la métropole qu'il distribue à une échelle plus fine. De là, le modèle suivant (présenté dans la section III, p. 213), Urban-TempÊst, estimera la température.

Le fonctionnement de URBAN-SPATIALIZER repose sur l'utilisation de *cartes de probabilités*, c'est-à-dire d'images du territoire en niveaux de gris où chaque valeur correspond à une probabilité. Ces cartes permettent de prendre en compte des contraintes spatiales spécifiques. Selon les situations, on combine plusieurs d'entre elles pour obtenir celle à appliquer : ainsi, au scénario qui s'intéresse par exemple aux axes de tramway, on associe la carte du PLU [34] à une carte contenant la mesure de la proximité à un arrêt du réseau de tramway. Celles-ci sont multipliées pour obtenir un masque qui est ensuite appliqué à la métropole, ce qui met en évidence les zones les plus pertinentes au regard des contraintes choisies (ici le PLU et le réseau de tramway) en associant une probabilité de mutation à chaque point du territoire.

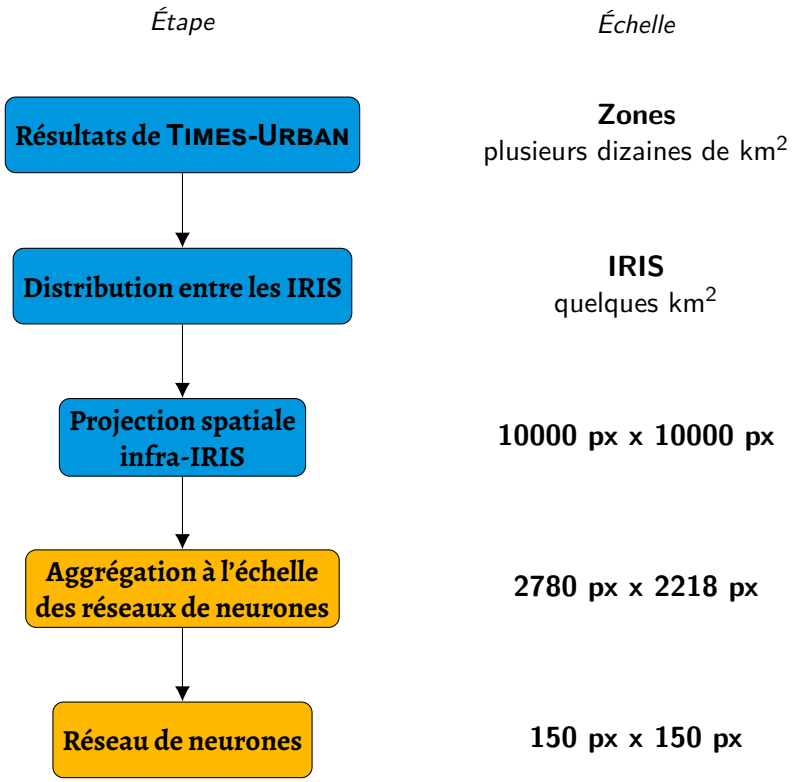


FIGURE 3.17 – Chaîne de post-traitement des résultats de TIMES-URBAN : le modèle URBAN-SPATIALIZER (●) crée une carte spatialement explicite de la distribution des archétypes de *formes urbaines* et de *bâtiments* qui est ensuite utilisée par le modèle URBAN-TEMPÊST (●) pour l'estimation de la température (voir section III plus loin pour plus de détails, p. 213).

La figure 3.17 résume les grandes lignes du fonctionnement de URBAN-SPATIALIZER : (*i*) les données sont **distribuées entre les différents IRIS** au sein des zones ; (*ii*) ensuite, une **projection spatiale** a lieu au sein de *chacun des IRIS* en utilisant des *cartes de probabilités* issues de plusieurs sources, ce qui produit une image de la répartition des archétypes au cours du temps. Les résultats de URBAN-SPATIALIZER sont ensuite utilisés par URBAN-TEMPÊST.

34. Voir section IV.1.b du chapitre 1, p. 51, pour plus d'informations sur le *Plan Local d'Urbanisme* (ou PLU).

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DU SCHÉMA

- **Lecture** des fichiers sources (`.VD`) sortis de TIMES-URBAN pour récupérer les variations à l'intérieur de chacune des zones existantes ;
- **Extraction** des zones et des périodes ;
- **Initialisation** de l'*année de référence* (ou *base year*) à partir des données préalablement récupérées ;
- Sur chaque année et sur chaque zone :
  - **Optimisation de la répartition** entre les IRIS (*cf.* section II.1), ce qui indique dans quels IRIS seront localisés les retraits de process et les nouveaux investissements dans les archétypes de formes urbaines et de bâtiments ;
  - Pour chaque IRIS alors modifié, projection spatiale (*cf.* section II.2) :
    - Création d'une **fenêtre** de 250 mètres autour de l'IRIS (pour éviter de manipuler la carte entière de la métropole) ;
    - Détermination d'où peuvent être modifiés les process existants retirés par TIMES-URBAN (la surface totale d'un IRIS étant constante, si TIMES-URBAN investit dans un nouvel archétype de forme urbaine, c'est qu'il retire une surface équivalente d'un autre archétype de forme urbaine). Le cas des bâtiments est légèrement différent, la contrainte reposant sur la projection préalable des formes urbaines et non sur la présence antérieure de l'archétype. Cette opération définit ainsi une zone de surfaces potentielles pour la modification ;
    - `Si` le process à ajouter est *déjà présent* dans cette zone, recherche du **meilleur endroit** par rapport aux archétypes similaires pour installer les nouveaux investissements, `Sinon`, sélection d'un **point au hasard** dans cette zone, Les deux opérations alternatives précédentes sont faites en *respectant des cartes de contraintes* (*cf.* section II.2.b) ;
    - Une fois qu'un point de départ a été identifié, **création d'une surface** autour de ce point de la bonne superficie en utilisant la carte de probabilité précédemment créée et en effectuant une forme de *watershed* [Beucher (1994)].
  - **Vérification** que les aires déterminées correspondent aux contraintes fixées par TIMES-URBAN.

Nous allons détailler dans les deux sections suivantes le fonctionnement de URBAN-SPATIALIZER en exposant tout d'abord le procédé de distribution au sein des zones de TIMES-URBAN, puis la projection spatiale qui est appliquée lorsque des investissements ou des changements ont lieu à l'intérieur d'un IRIS.

II.1. Une distribution par allocation optimale entre les IRIS

La première étape de URBAN-SPATIALIZER consiste à pallier le manque de finesse du modèle TIMES-URBAN en terme de résolution spatiale. Une nouvelle couche d'optimisation encadrée et contrainte par les choix du framework est appliquée à l'intérieur de chacune des 19 zones à partir des résultats de l'année précédente et chaque période successivement. Le but de cette étape est de distribuer optimalement les modifications d'archétypes de formes urbaines et de bâtiments à l'échelle IRIS. La figure 3.18 en présente le principal général de fonctionnement. Le critère à minimiser retenu pour l'optimisation est fonction de la superficie de terrains modifiés, de la compatibilité des archétypes retirés avec les archétypes présents initialement, et avec les IRIS. La formulation mathématique du problème d'optimisation est détaillée dans l'annexe I, p. 459.

Le principe du modèle d'optimisation linéaire de URBAN-SPATIALIZER imite celui de TIMES-URBAN présenté dans les sections précédentes du présent chapitre. Il fonctionne donc de la façon suivante : les archétypes de sol produisent entre autres deux types de sol, *bâtissable* et *autres* ; le sol de type *autres* peut être converti en sol *bâtissable* ; le sol *bâtissable* peut être utilisé par des bâtiments. Le lien avec TIMES-URBAN est fait par des variables exogènes fixant le niveau global (sur l'ensemble des IRIS d'une même zone) de chacune des surfaces (celles occupées par les archétypes de formes urbaines, par les bâtiments, etc.).

Il pourrait paraître surprenant que nous ayons ajouté cette étape supplémentaire au lieu de directement répartir spatialement les changements de chaque zone. Toutefois, plusieurs points nous ont arrêté ici : tout d'abord, le souci de conserver des temps de calcul raisonnables permettant des tests sur des ordinateurs habituels impose cette étape supplémentaire qui permet de s'assurer que l'étape de projection spatiale (décrite dans la partie II.2) est relativement *calculable* (puisqu'elle manipule des images de dix milles de pixel de côté pour chaque zone étudiée et applique plusieurs algorithmes pouvant être gourmands en temps de calcul) ; la possibilité de *pouvoir contraindre* ou de manipuler de façon particulière, pour des raisons politiques ou non, un quartier ou une commune ; enfin, le besoin de tester l'*éventualité de l'utilisation de modèles linéaires simples* pour l'étape de modélisation principale (décrite dans la section I) [35]. Nos motivations sont certes orientées initialement par des questions calculatoires et il serait possible de diminuer la résolution de la carte de la métropole produite ici, au détriment

35. En effet, au regard des similarités entre les équations de ce procédé et du modèle précédent, il pourrait paraître légitime de questionner à nouveau l'utilisation d'un système aussi complexe que MARKAL/TIMES pour l'élaboration de TIMES-URBAN. Un modèle plus simple mais plus souple, plus facilement modifiable, moins dépendant d'infrastructures logicielles lourdes (comme VEDA) tel que celui que nous construisons ici semble pouvoir remplir un office semblable. Néanmoins, l'utilisation de TIMES fournit également de larges pistes d'amélioration et notamment d'intégration plus largement dans un modèle urbain, régional ou national de prospective énergétique, pour tester entre autres l'impact de décisions locales sur un mix comme la recherche d'autonomie énergétique par exemple.

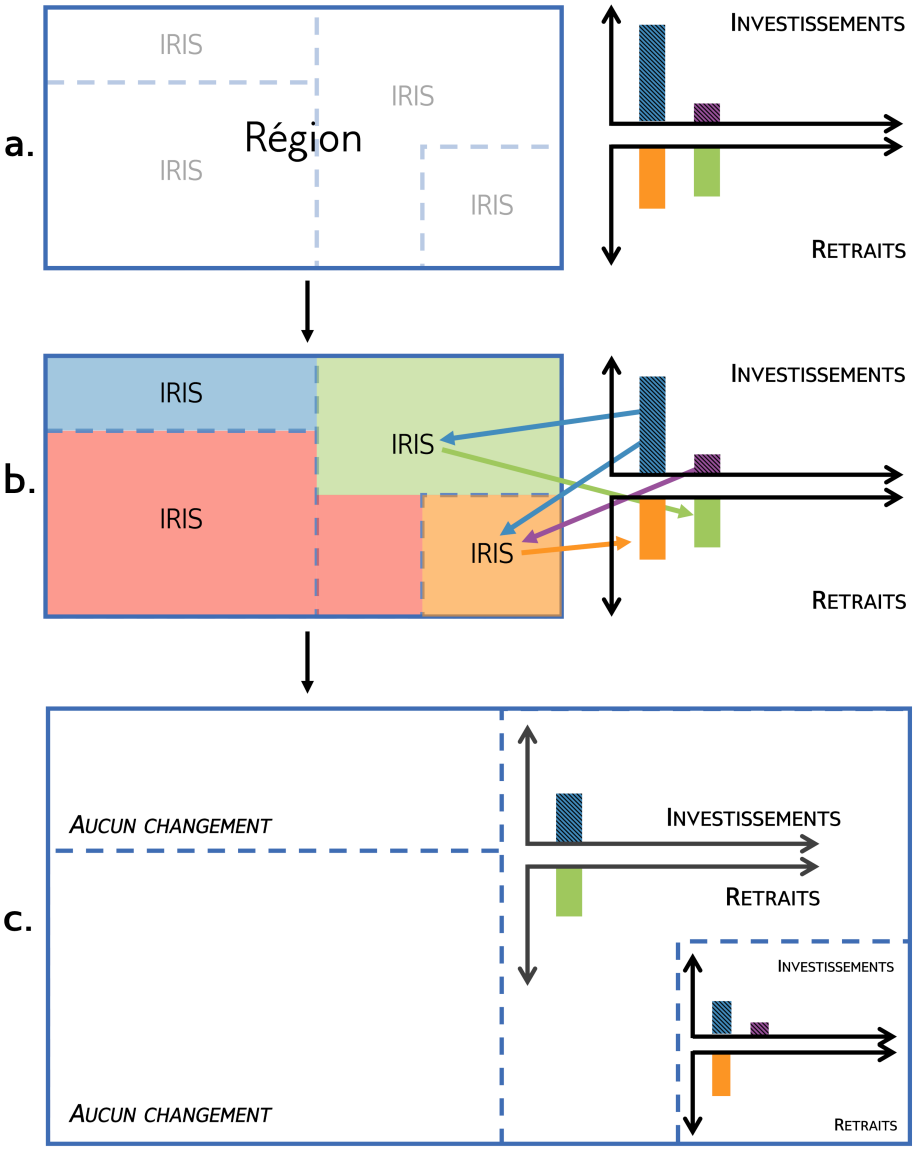


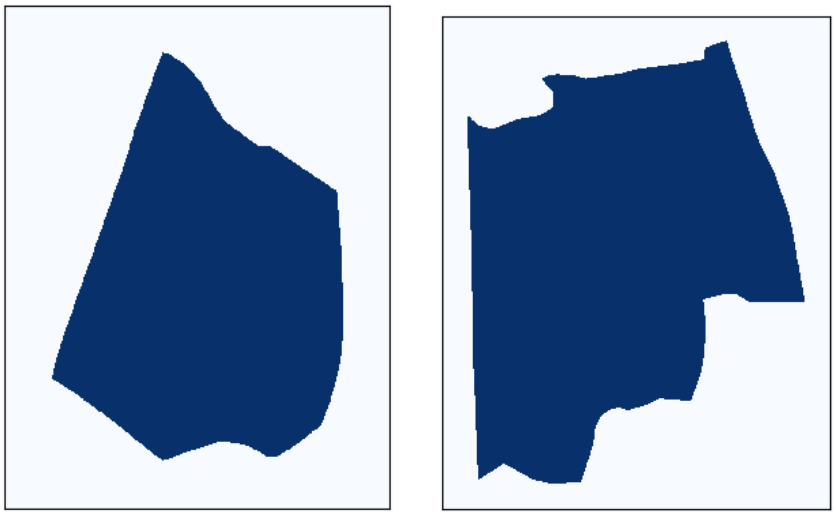
FIGURE 3.18 – Principe général de la distribution spatiale : des décisions de TIMES-URBAN à l'échelle d'une zone pour l'année $n + 1$ (a.), on se base sur les archétypes présents à l'année n (b.) pour effectuer la distribution au sein des IRIS (c.). Un IRIS n'abrite pas forcément un seul archétype, comme c'est par exemple le cas de l'IRIS du coin haut droite qui abrite deux archétypes (une partie verte et l'autre route).

de précision de la représentation finale. L'échelle de l'IRIS semble toutefois largement plus pertinente que celle des 19 zones, comme cela a été discuté dans le chapitre 2 au sein de la section II.1, p. 112.

II.2. De la projection spatiale par cartes de contraintes

Le second algorithme de URBAN-SPATIALIZER utilise des cartes de contraintes pour procéder à la projection spatiale. Nous n'avons en effet, jusque-là, pas encore atteint réellement la finesse spatiale nécessaire puisque nos résultats se trouvent maintenant distribués au niveau des IRIS. Chaque IRIS est traité séparément en ajoutant 250 m de chaque côté de ses limites pour obtenir un rectangle complet afin d'éviter des effets de bord. Le résultat d'une projection est ensuite sauvegardé pour être utilisé pour les années suivantes. Il faut parfois appliquer des heuristiques pour contourner les situations où les cartes ne fournissent pas d'information particulière (c'est souvent le cas dans les bordures de la métropole). Les cartes utilisées – présentées dans la section II.2.a – ne concernent en effet pas systématiquement toute la métropole et donc tous les IRIS. L'accès aux arrêts de tram est par exemple possible dans certaines zones mais de nombreuses villes de la métropole ne disposent pas du tout d'arrêt de tram. Certains IRIS ne présentent également aucune prescription particulière par le PLU. Il arrive donc que des portions de l'espace soient identiques au regard des choix d'investissement, ce qui explique le besoin d'heuristiques.

La projection se passe de la façon suivante : lorsqu'un IRIS a été sélectionné pour des décisions d'investissement et de retrait par l'algorithme de distribution précédent, cela signifie qu'une certaine aire y est concernée. Pour déterminer l'emplacement de ce changement, nous procédons en deux temps : d'abord en *sélectionnant un point de départ* dans la zone, puis en *agrandissant* un cercle autour de ce point dans le respect des cartes de contraintes jusqu'à obtenir la superficie fixée par la distribution optimale de l'étape d'avant.



(A) Quartier Parabelle d'Ambarès-et-Lagrave (est de la métropole).

(B) Quartier Le Lac 1 de Bordeaux (nord de la ville).

FIGURE 3.19 – Carte de deux IRIS choisis comme illustration de l'algorithme de URBAN-SPATIALIZER.

Nous illustrons la démarche par l'utilisation de deux IRIS comme exemples, présentés en face à face à chaque étape, et dont la figure 3.19 affiche les contours. Nous décrivons ici le fonctionnement de l'algorithme pour un archétype de forme urbaine mais le principe reste identique au moment de réaliser la projection d'un investissement d'un archétype de bâtiment. La seule différence, déjà mentionnée plus haut, est qu'on ajoute comme carte de contraintes la disponibilité de terrain bâti modifié récemment et que la présence antérieure d'un archétype similaire n'entre plus en compte.

II.2.a. Des cartes de contraintes métiers

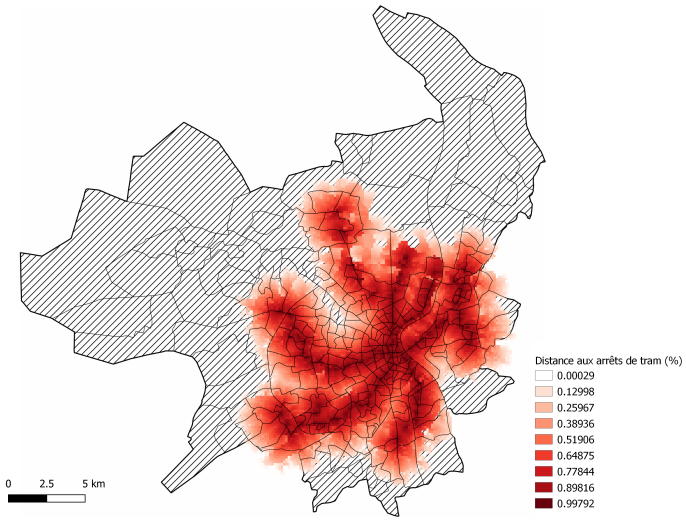


FIGURE 3.20 – Carte des contraintes de la distance au tram.

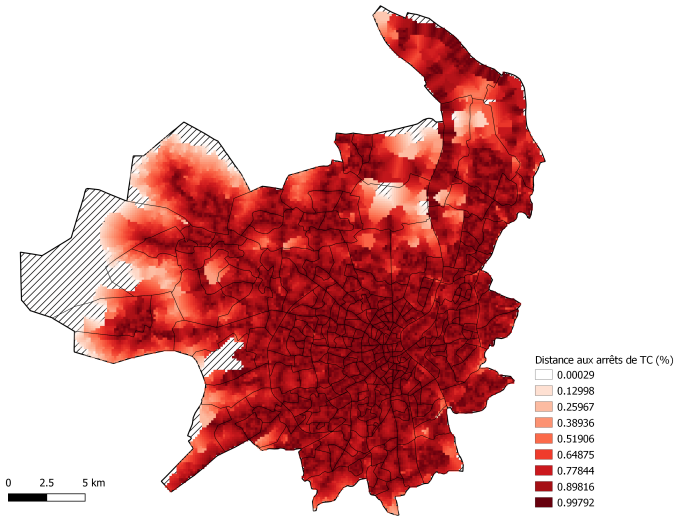


FIGURE 3.21 – Carte des contraintes de la distance au bus et au tram.

L'intérêt principal de notre approche pour la projection spatiale est d'utiliser des objets déjà répandus et faciles à manipuler puisqu'il s'agit de simples cartes. Ces cartes, représentant par exemple les décisions du Plan Local d'Urbanisme (*cf.* figure 3.22) ou bien affichant la distance aux arrêts de transports en commun (*cf.* figures 3.20 et 3.21), sont simplement converties en cartes de contraintes, c'est-à-dire qu'elles représentent la probabilité, en chaque point de l'espace (dans une

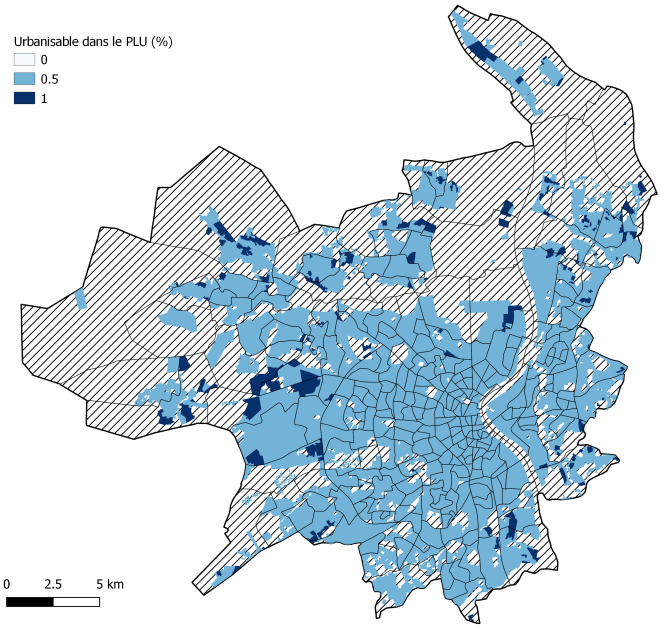


FIGURE 3.22 – Carte des contraintes du PLU.

certaine résolution, ici 10 000 × 10 000 pixels), de changer. Cette méthode, finalement peu usitée dans les approches de modélisation urbaine, donne l'occasion de résumer plusieurs principes en une seule contrainte facilement visualisable et modifiable [36].

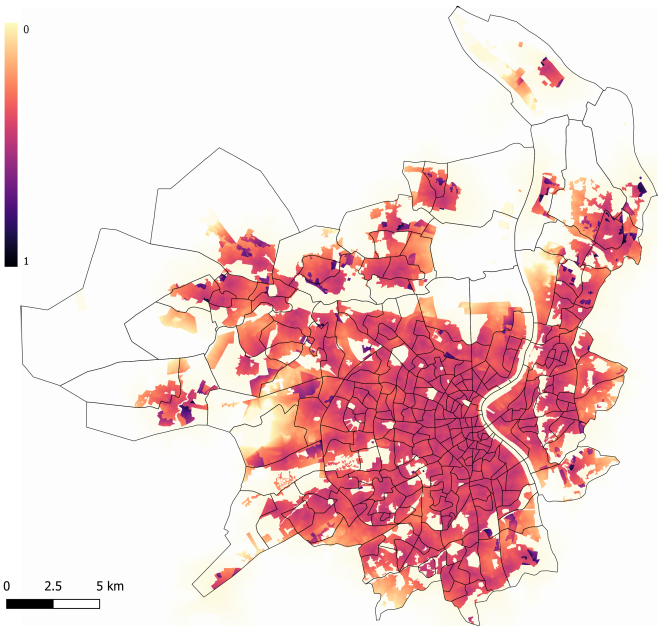


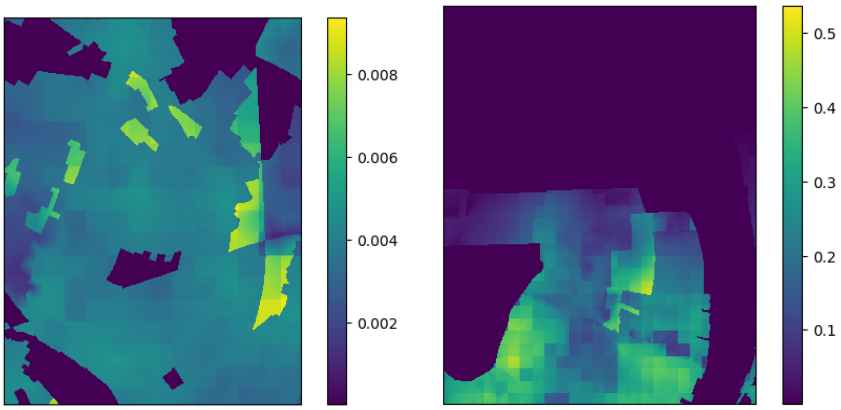
FIGURE 3.23 – Combinaison de la carte des écoles et de celle du PLU.

Les cartes présentées dans les figures 3.20, 3.21 et 3.22 peuvent être combinées selon les besoins ou la pertinence de leur application dans les cas étudiés, ou encore être réservées à des archétypes particuliers (qui ne pourraient pas être déployés partout [37]). Par exemple, la carte 3.23 est la multiplication des deux cartes liées

36. Cette technique est assez proche de ce qu'ont pu utiliser LIGMANN-ZIELINSKA et al. (2008) dans leur approche par couches de grilles [LIGMANN-ZIELINSKA et al. (2008)].

37. On pourrait ainsi stipuler que la proposition de nouvelle forme urbaine créée par ANMA

au PLU et à la proximité aux écoles maternelles et primaires. Un scénario long terme de TIMES-URBAN est alors accompagné de cartes de contraintes spécifiques adaptées. Ainsi, les deux cartes 3.20 et 3.21 sont utilisées pour la projection de résultats de cas s'intéressant au développement des zones accessibles par les transports en commun.



(A) Quartier Parabelle d'Ambarès-et-Lagrave.

(B) Quartier Le Lac 1 de Bordeaux.

FIGURE 3.24 – Cartes des contraintes dans les cas des deux quartiers considérés (probabilités allant de 0 à 1).

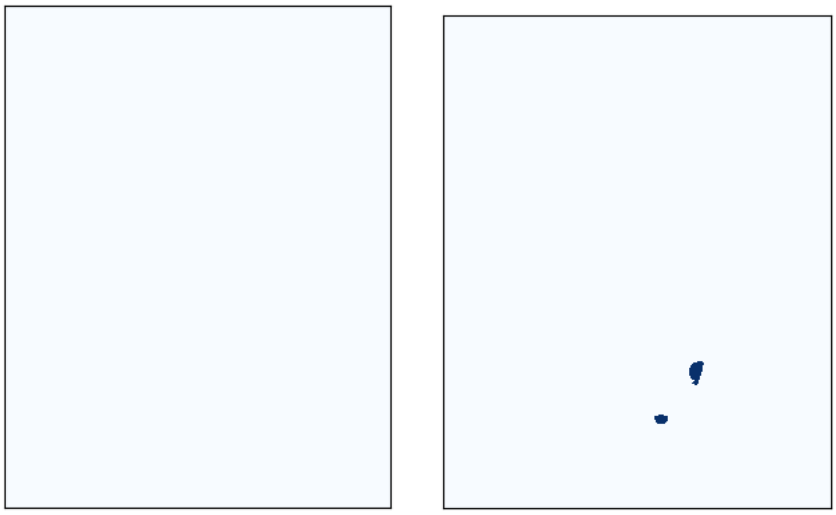
Les cartes de la figure 3.24 affichent les contraintes visibles et disponibles autour des deux quartiers utilisés comme exemples. On peut tout d'abord remarquer que les échelles sont très différentes, attestant que le quartier d'Ambarès-et-Lagrave (voir figure 3.24a), situé plutôt en périphérie de la métropole, fait l'objet de moins fortes probabilités (liées à l'accès aux transports ou aux potentiels soulignés par le PLU) que le quartier bordelais. En outre, on peut constater qu'une partie non négligeable de la carte 3.24b du quartier du Lac est vide, imposant, le cas échéant, d'appliquer un autre critère de sélection.

II.2.b. Sélection d'une zone de déploiement des modifications

Choix d'un point de départ

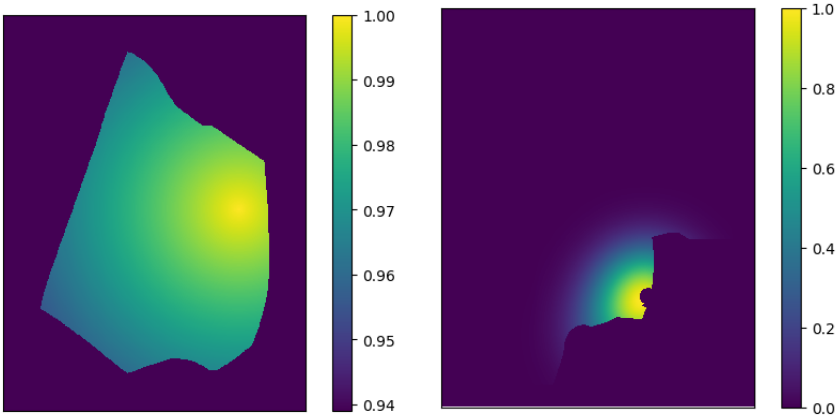
Pour sélectionner un point, nous utilisons deux techniques selon si le nouveau *process* devant être déployé était présent précédemment – sous la même forme ou depuis l'année de référence – ou non au sein de la zone considérée. S'il existe une surface occupée par cet archétype, on floute ces zones pour obtenir un effet de gradient de distance que l'on combine aux cartes de contraintes. De la sorte, on obtient une forme d'image de proximité autour des espaces déjà utilisés par cet archétype et qu'il pourrait être pertinent d'élargir tout en respectant les contraintes imposées par les cartes. Dans le cas contraire, nous prenons une valeur aléatoire en utilisant les cartes de contraintes seules. La figure 3.26 montre les résultats de la création de ce gradient dans les deux cas cités précédemment : le quartier

pour La Jallère, décrite dans la partie IV.3.a.1 du présent chapitre, p. 159, n'est compatible qu'avec des territoires présentant déjà une forte couverture végétale. Ainsi, on créerait une carte, spécifique à cette forme urbaine, où la probabilité – ou compatibilité – est égale à 0 partout sauf dans les zones où la végétation est suffisamment présente.



(A) Quartier Parabelle d'Ambarès-et-Lagrave. (B) Quartier Le Lac 1 de Bordeaux.

FIGURE 3.25 – Présence ou non de la forme urbaine dans l'année précédente (ici 2015) dans les deux quartiers. On remarque par exemple que le quartier Parabelle (gauche) ne dispose pas de l'archétype considéré initialement, imposant de prendre un gradient basé sur les cartes de contraintes seules et non sur la condition d'antériorité.



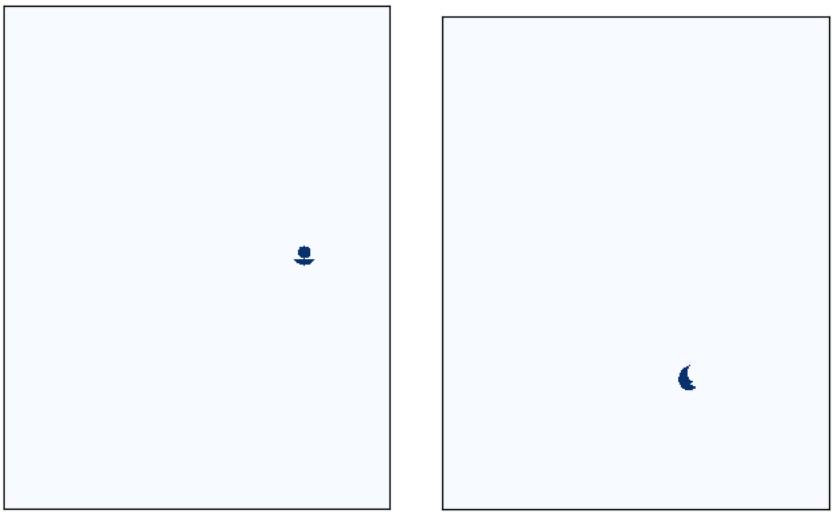
(A) Quartier Parabelle d'Ambarès-et-Lagrave. (B) Quartier Le Lac 1 de Bordeaux.

FIGURE 3.26 – Gradients de probabilité de lancement des nouveaux investissements dans l'archétype à partir des points sélectionnés. On notera dans l'image de l'IRIS *Le Lac 1* (droite) qu'un morceau de l'IRIS a été retiré. Il correspond à un élément déjà modifié lors d'une année précédente et n'est donc pas modifiable par l'algorithme qui ne le considère pas comme potentiel.

Parabelle montre un gradient tiré aléatoirement en l'absence d'antécédents, tandis que le quartier du Lac crée un gradient à partir des surfaces couvertes par un archétype similaire (voir la carte 3.25b qui atteste de cette présence).

Comme le développement d'un projet urbain s'échelonne sur plusieurs années voire décennies, des portions d'un même quartier émergent successivement au cours des travaux. C'est cet effet que tente de reproduire en partie l'algorithme décrit au paragraphe précédent en sélectionnant, pour chaque année, des formes urbaines similaires comme points d'attraction pour le déploiement des nouvelles modifications.

Expansion autour de ce point



(A) Quartier Parabelle d'Ambarès-et-Lagrave.

(B) Quartier Le Lac 1 de Bordeaux.

FIGURE 3.27 – Formes finales retenues pour le déploiement des nouveaux archétypes.

À partir du point défini comme référence, on utilise la carte créée pour l'identification du point d'intérêt que l'on restreint à l'IRIS étudié. On applique alors une méthodologie similaire à la façon dont la *watershed* fonctionne en morphologie mathématique [BEUCHER (1994)]. L'image est vue comme un relief, avec les valeurs fortes comme altitudes faibles et réciproquement, ce qui permet ensuite de créer des aires de plus en plus importantes en suivant les lignes de niveaux, de la même façon que l'on remplirait une cuvette naturelle avec de l'eau dont le niveau grimperait petit-à-petit les niveaux pour créer un lac d'une certaine superficie. Ici, on procède de la sorte, la carte de probabilité précédemment générée donnant le relief dans lequel bâtir l'aire à investir. Dans les zones dépourvues de relief, la forme est remplacée par un simple disque.

Ce procédé est répété chaque période de la modélisation [38] pour chaque IRIS et chaque investissement. Nous obtenons donc progressivement une nouvelle répartition du sol de la métropole entre différents archétypes, carte explicite de l'occupation du territoire, qui va pouvoir être utilisée pour la dernière étape de notre chaîne de modélisation.

38. Voir section I.1.a, p. 177, pour la description des périodes utilisées par TIMES-URBAN et *a fortiori* par URBAN-SPATIALIZER.

III. URBAN-TEMPÊST, pour la création d'une carte de macro-paramètre

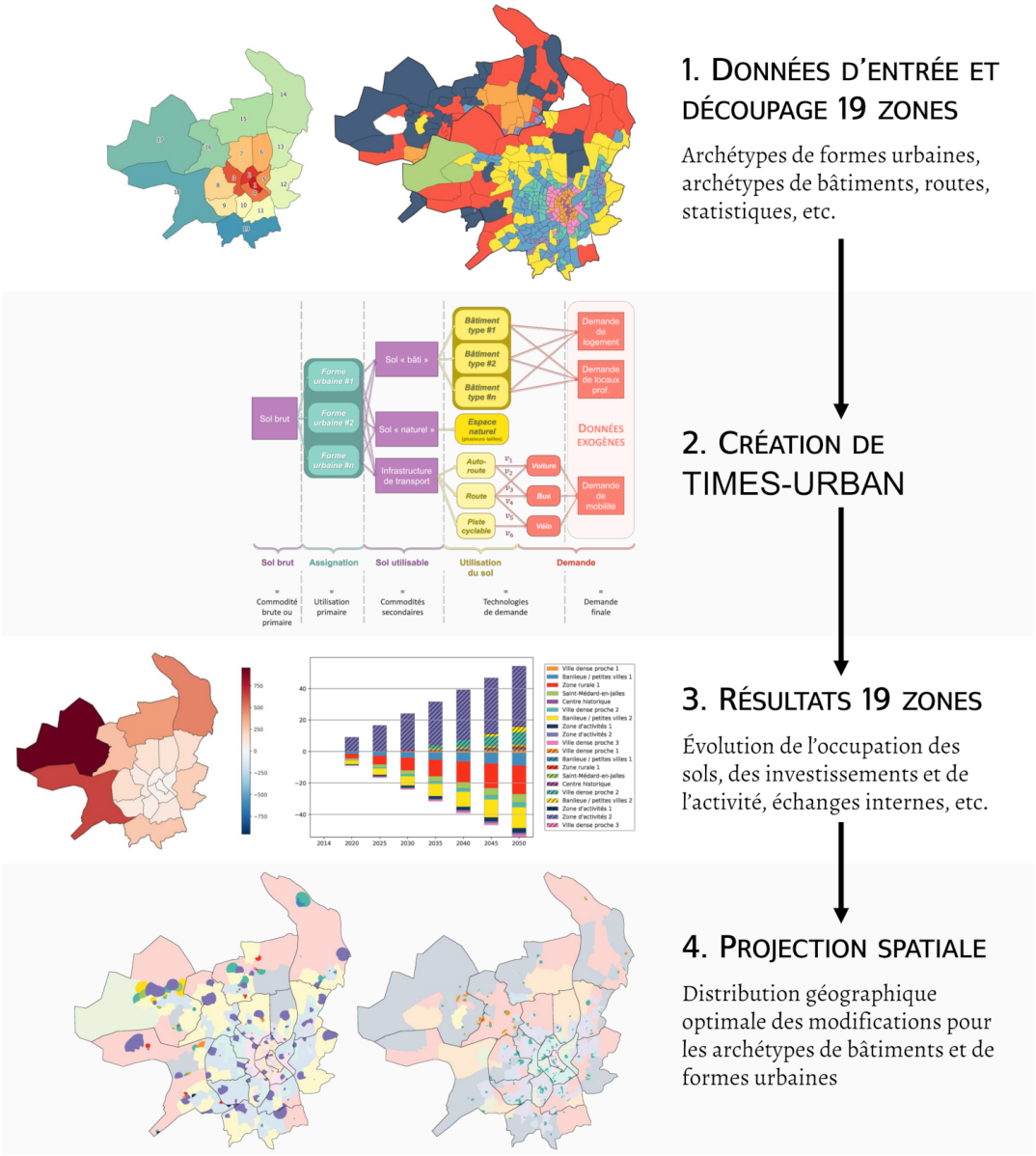


FIGURE 3.28 – Résumé de la méthodologie : les résultats de TIMES-URBAN ont été distribués géographiquement à travers le territoire pour former deux nouvelles cartes pour chaque scénario de l'état d'utilisation du sol et des bâtiments au fur et à mesure des années.

Cette dernière étape de la modélisation convertit la carte d'archétypes créée par les étapes précédentes en informations spatiales sur un macro-paramètre. Le but ici est d'obtenir un moyen supplémentaire de discuter la pertinence environnementale d'un scénario et de représenter rapidement l'effet de divers choix d'aménagement, donc de parvenir à une carte d'évolution d'un macro-paramètre permettant d'évaluer la pertinence ou non de certaines solutions proposées par les exercices prospectifs.

Plusieurs paramètres peuvent correspondre à cet objectif : l'imperméabilisation des sols, la présence d'espaces naturels, la demande en énergie… Parmi ceux-ci,

la température est un élément pertinent, à la fois pour l'approche des urbanistes, pour le confort des habitants et la viabilité en ville, mais aussi au vu de la profusion de littérature sur le caractère critique des îlots de chaleur urbains (ICU) et leur possible emballement dans les années à venir [Masson et al. (2014) et Terrin (2015)]. La température en milieu urbain peut correspondre d'une part à la température du sol (ou *Land Surface Temperature*), et d'autre part à la température de l'air (généralement à 2 mètres au-dessus du sol). Cette dernière est particulièrement utile pour étudier les problématiques environnementales urbaines [Chen et al. (2016), Golkar et al. (2018), Nichol et Wong (2008) et Yoo et al. (2018)] telles que les îlots de chaleur urbains et la pollution de l'air [Şahin (2012) et Yoo et al. (2018)].

III.1. Utilisation d'une méthode statistique plutôt que physique

Il existe plusieurs façons d'estimer la température à partir d'autres paramètres : soit nous parvenons à trouver une **relation** entre les caractéristiques dont nous disposons et la température, à partir de publications scientifiques (procédé *physique*), soit nous utilisons des techniques d'apprentissage artificiel pour pouvoir évaluer une carte de température à partir des autres cartes (procédé purement *statistique*) [39].

III.1.a. Les méthodes existantes d'estimation des températures

L'estimation de la température de surface du sol, que l'on dénommera LST pour plus de facilité par la suite, est un problème fréquemment traité [Kalma et al. (2008) et Z.-L. Li et al. (2013)]. Celle-ci est plus facile à estimer que la température de l'air, notamment à partir d'images satellites [Şahin (2012)]. Historiquement, la LST est généralement reliée à un paramètre caractérisant l'occupation des sols, l'indice de végétation par différence normalisée (ou *normalized difference vegetation index*), que l'on notera NDVI par la suite [40]. Des études ont utilisé d'autres approches pour estimer la LST, notamment en préférant le pourcentage de surface imperméable, et trouvent une meilleure explicabilité pour les années considérées [Rajasekar et Weng (2009) et Yuan et Bauer (2007)]. Certains travaux soulignent la forte corrélation linéaire entre le coefficient d'emprise des sols (ou

39. On peut remarquer ici la similitude du questionnement avec celui de la pertinence de la construction d'archétypes par une approche statistique opposée à une étude architecturale ou urbanistique de la métropole.

40. L'étude de Yuan et Bauer (2007), établit ainsi une rapide revue bibliographique des études ayant fait un tel lien, majoritairement réalisées dans les années 1990. Sont ainsi cité les travaux de Gallo et al. (1993), Lo et al. (1997), Gallo et Owen (1999), Carlson et al. (1995), Gillies et Carlson (1995), Gillies et al. (1997), Goward et al. (2002). Certaines de ces études se penchent sur le fonctionnement de cette relation et de cas pratiques l'illustrant [Gallo et al. (1993), Lo et al. (1997), Gallo et Owen (1999)] tandis que d'autres [Carlson et al. (1995), Gillies et Carlson (1995), Gillies et al. (1997), Goward et al. (2002)] s'en servent pour l'évaluation d'autres paramètres relatifs à la végétation. Une corrélation négative a bien été montrée, une baisse de l'imperméabilité des surfaces coincidant avec une baisse de la température. Néanmoins, les auteurs remarquent que la relation n'est pas linéaire et que la mesure de l'indicateur NDVI dépend fortement de la surface, les conduisant à douter de la pertinence de l'utilisation de ce paramètre seul pour l'estimation de la température et l'étude des ICU.

GCR) et la LST (avec des facteurs de régression R^2 de 0,921 et 0,909 pour deux années récentes) [ZHAN et al. (2015)]. Ces deux indicateurs, imperméabilité et coefficient d'emprise sont tous deux d'autres formes de représentation indirecte de la présence de végétation (l'imperméabilisation indiquant si le sol a été artificialisé ou non, une faible imperméabilité témoignant de présence importante de « pleine terre ») et ils peuvent être utilisés dans des méthodes de calcul différentes qui conduisent éventuellement à une meilleure fiabilité.

Il apparait toutefois que toits végétalisés et arbres n'ont pas les mêmes effets sur les périodes de canicule tout au long de l'année [DE MUNCK et al. (2017)]. L'utilisation de ces deux indicateurs ne remplace pas une connaissance plus fine de la végétation qui joue un rôle important, particulièrement en milieu dense, dans la diminution de l'intensité des ICU. Parmi les caractéristiques urbaines influençant la formation d'ICU, le ratio de forme des rues (c'est-à-dire le rapport entre la largeur de l'espace dégagé et la hauteur des murs – des façades – entourant la chaussée) a un effet majeur [ALI-TOUDERT et MAYER (2006), KOLOKOTRONI et GIRIDHARAN (2008) et MAVROGIANNI et al. (2009)] mais le rafraichissement de la chaussée ou des trottoirs par aspersion peut également aider à baisser la température [DANIEL et al. (2018)]. Ces paramètres influencent donc tous la formation et l'intensité des ICU et il est difficile de conclure à l'efficacité absolue et universelle de telle ou telle mesure par rapport à une autre, la performance de ces méthodes étant dépendante des autres caractéristiques du milieu urbain considéré [DE MUNCK et al. (2017) et NG et al. (2012)].

III.1.b. Vers la construction d'un réseau de neurones à partir des données de URBAN-SPATIALIZER

L'approche statistique est dans un premier temps aussi efficace qu'une méthode physique et permet de se passer de données satellites. L'application de ce genre de méthode est largement compatible avec la méthodologie par les données que nous avons utilisées jusque-là pour la description quantitative de la métropole bordelaise. En outre, par la richesse des paramètres qui caractérisent nos archétypes et sont donc disponibles en sortie de TIMES-URBAN et de URBAN-SPATIALIZER, il nous est possible d'enrichir l'approche statistique classique en considérant dans l'estimation de la température un grand nombre de variables liées aux formes urbaines et aux bâtiments, c'est-à-dire aux conditions urbanistiques plutôt que physiques. Enfin, pour estimer la température de l'air qui est plus pertinente pour l'étude des ICU, il convient d'innover, particulièrement dans un cadre de recherche où nous procédons à une telle estimation sur le long terme et en l'absence de données satellites pour 2050.

Aussi, nous avons construit plusieurs modèles d'apprentissage artificiel pour estimer la température à partir des données dont nous disposons déjà [41], comme la densité de bâti, d'espaces naturels et de sol artificialisé (la corrélation entre cet élément et la température est d'ailleurs vérifiée [YUAN et BAUER (2007)]). Nous avons essayé plusieurs solutions : *régressions linéaires* (qui n'ont pas fonctionné, résultat attendu puisqu'il n'existe a priori pas de relation simple entre ces paramètres et la température d'après la littérature précédemment citée), *machines*

41. On pourra se référer aux résultats de la définition des archétypes (*cf.* chapitre 2, p. 87).

à vecteurs de support (SVM, ou SVR pour la régression) et *réseaux de neurones*. Ces deux dernières techniques avaient de meilleures chances de réussir au vu des conclusions de la littérature scientifique présentées ci-dessus.

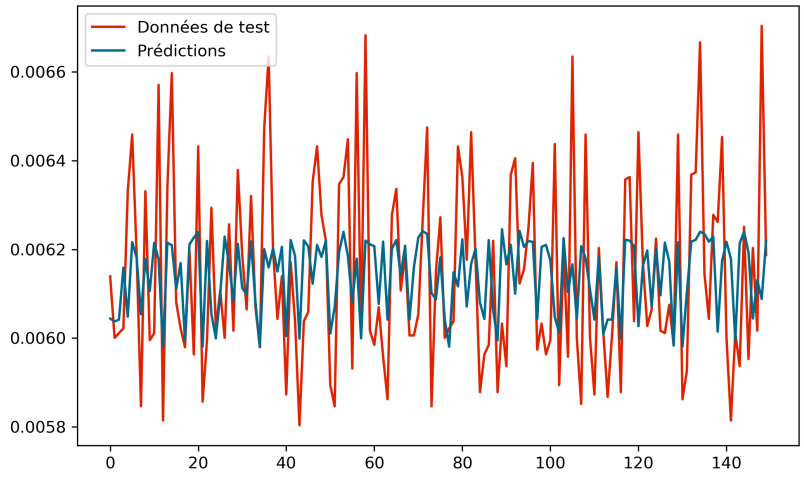


FIGURE 3.29 – 150 prédictions du modèle de régression linéaire testé sur les données utilisées (l'unité de l'axe des ordonnées arbitraire, les données étant normalisées).

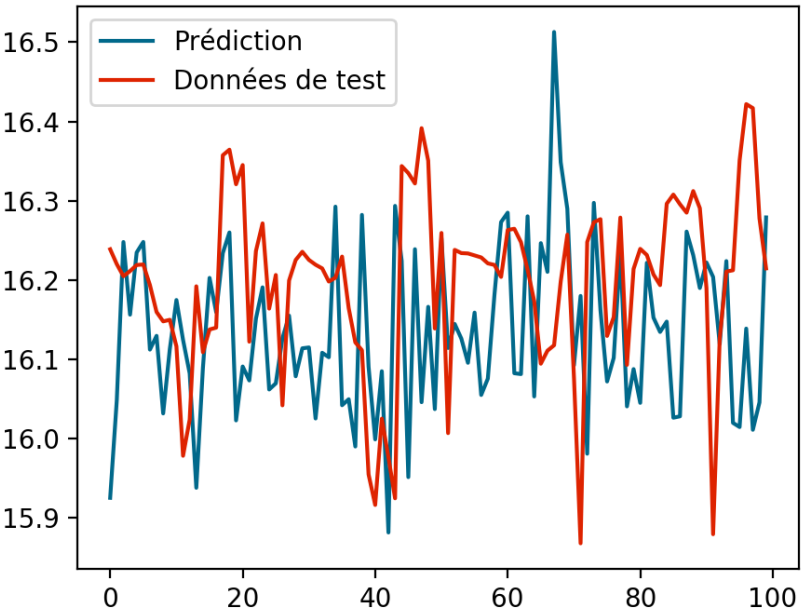


FIGURE 3.30 – 100 prédictions du SVR (Support Vector Regression) testé sur les données utilisées (en °C).

Les figures 3.29 et 3.30 présentent les prédictions réalisées sur un petit nombre de points de la métropole avec les régressions linéaires (qui obtiennent alors un score R^2 de 0,1322) et les SVR (qui obtiennent un score R^2 de 0,2567). Les meilleures estimations ont été obtenues avec des réseaux de neurones à convolution dont nous allons présenter notre utilisation par la suite.

Après avoir brièvement décrit le fonctionnement des réseaux de neurones à convolution (voir sous-section III.2), nous pourrons décrire la structure originale du réseau de neurones URBAN-TEMPÊST adapté à notre problème (voir sous-section III.2.d). Nous expliciterons ensuite les paramètres utilisés pour notre estimation (voir sous-section III.3) avant de présenter les résultats de l'entrainement (voir sous-section III.4). Enfin, il nous faudra établir le lien entre les résultats fournis par URBAN-SPATIALIZER et les entrées de URBAN-TEMPÊST (voir sous-section III.5), concluant là notre chaîne de modèles.

III.2. Fonctionnement d'un réseau de neurones : du principe général à une forme adaptée à la spatialité

Un *réseau de neurones* (dénomination à laquelle est parfois apposé le qualificatif *artificiel*) est une construction à la fois mathématique et informatique qui a vocation à estimer une sortie à partir de données d'entrée. Ce système s'est développé dans la deuxième moitié du XX$^{\text{ème}}$ siècle suite à des études biologiques d'abord puis la mise-au-point d'un premier réseau, le perceptron [MCCULLOCH et PITTS (1943) et ROSENBLATT (1958)].

III.2.a. La brique fondamentale : le neurone

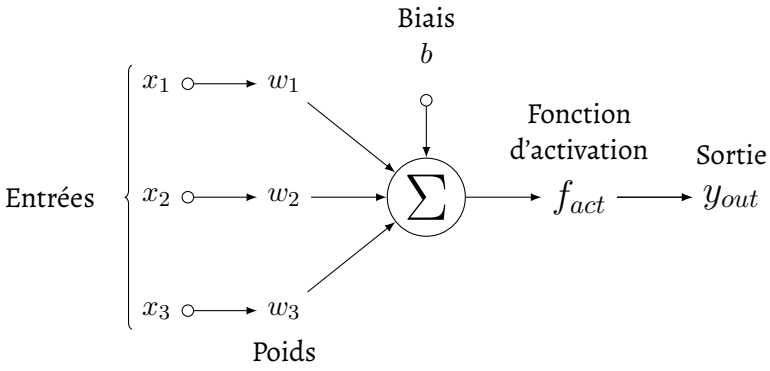


FIGURE 3.31 – Principe de fonctionnement d'un neurone en *machine-learning* (d'après https://medium.com/momenton/typesetting-neural-network-diagrams-with-tex-4920b6b9fc19).

Le réseau de neurones est composé par des *neurones* qui s'inspirent du fonctionnement des entités biologiques éponymes. La figure 3.31 expose le principe d'un neurone artificiel : celui-ci effectue une combinaison linéaire de ses n entrées (notées x_1, x_2 et x_3 sur la figure) avec des poids qui peuvent être modifiés (notés w_1, w_2 et w_3 sur la figure) à laquelle est ajouté un biais (noté b sur la figure) ; une fonction dite *d'activation* (notée f_{act} sur la figure) est appliquée à la nouvelle valeur obtenue fournissant la valeur de sortie (notée y_{out} sur la figure). Des fonctions communément utilisées pour l'activation d'un neurone sont l'*identité* ($f : x \mapsto x$), la *sigmoïde* ($g : x \mapsto \frac{1}{1+e^{-x}}$), le redresseur ou *ReLU* ($h : x \mapsto \max(x, 0)$)...

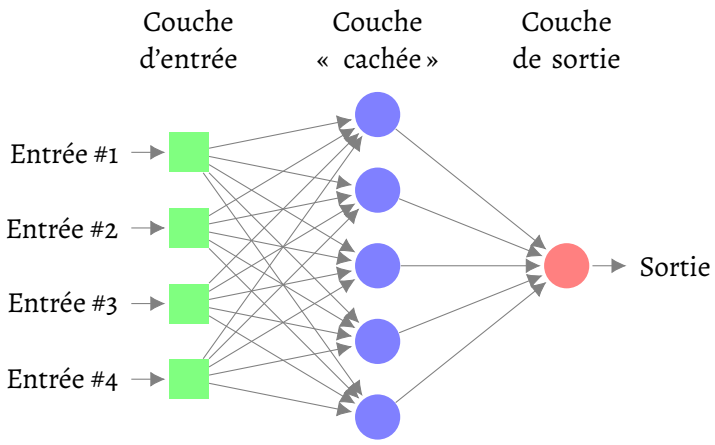


FIGURE 3.32 – Graphe d'un réseau de neurones complet (d'après https://texample.net/tikz/examples/neural-network/).

III.2.b. Le fonctionnement des réseaux de neurones

L'assemblage de plusieurs de ces neurones forme des couches, chaque couche utilisant les mêmes entrées et fournissant plusieurs sorties. La figure 3.32 présente ainsi un exemple de réseau à trois couches, une couche d'entrée avec quatre valeurs, une couche dite « cachée » avec cinq neurones puis une couche de sortie avec un seul neurone. En disposant d'un ensemble de données dont on connait les sorties correspondantes et en appliquant un algorithme de rétropropagation d'erreur, il est possible dans certaines conditions de modifier automatiquement les poids internes du réseau (c'est-à-dire les poids des combinaisons linéaires et les biais) : c'est la phase dite d'*entraînement*. Le réseau obtenu à l'issue de ce procédé est alors capable d'estimer une valeur de sortie à partir de valeurs d'entrées, avec plus ou moins de réussite selon la qualité de cette phase.

Les scores du réseau de neurones dans d'autres situations, c'est-à-dire sur des données d'entrées dont on ne lui fournit pas la valeur de sortie, déterminent la fiabilité ou non du réseau. On ajoute donc généralement une phase dite de *validation* après la phase d'entraînement qui consiste à fournir au réseau des données d'entrées seules (qu'il n'a pas vues pendant son entraînement pour éviter un surapprentissage [42]) et de comparer ses réponses aux sorties (connues elles-aussi pour cette phase). En fonction des résultats du modèle, on en modifie la structure [43] pour ensuite recommencer l'entrainement puis la validation.

À l'issue des deux phases, lorsque les résultats du réseau aux données de validation sont satisfaisants, on utilise le dernier ensemble de données d'entrées dont on connait les valeurs de sortie associées [44] pour procéder à nouveau à des

42. Le réseau est en état de surapprentissage lorsqu'il est capable d'« apprendre par cœur » les réponses correspondantes aux entrées. Ce processus survient généralement quand le réseau est trop complexe par rapport à la masse de données disponibles pour l'entrainement du réseau. Dans ce cas, le modèle sera très efficace sur les données d'entrainement mais catastrophique sur les données de validation qui ne rentrent pas dans le vocabulaire que le réseau a enregistré pendant l'entraînement. Des techniques ont été mises au point pour pallier ce problème, consistant notamment à supprimer des neurones du réseau au cours de l'apprentissage [SRIVASTAVA et al. (2014)].

43. On parle parfois d'en modifier les *méta-paramètres*.

44. On aura en fait au début de l'expérience séparé les données d'entrées et celles de sortie associées en trois ensembles : un, le plus grand pour l'entrainement, un pour la validation et un

estimations qu'on compare avec les sorties réelles : c'est la phase de *test*. Les caractéristiques statistiques des résultats sur l'ensemble de données de *test* définissent les performances finales du réseau.

III.2.c. Les réseaux de neurones à convolution

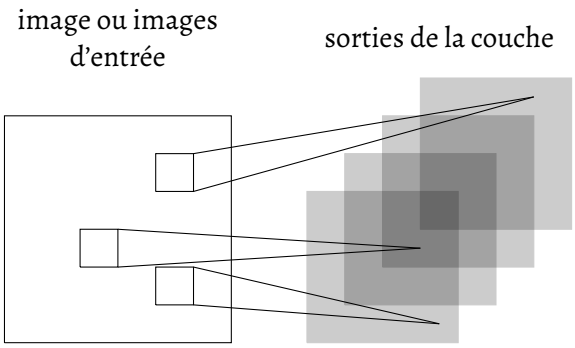


FIGURE 3.33 – Principe de base d'une couche de convolution qui utilise des morceaux de l'image (ou des images) d'entrée pour construire les images de sortie. La taille de ces « morceaux » est définie par ce qu'on appelle un noyau de convolution qui contient généralement des poids qui vont être modifiés au fur et à mesure de l'entraînement du réseau (d'après https://github.com/davidstutz/latex-resources).

À ces principes généraux de fonctionnement des réseaux de neurones s'ajoute dans notre cas l'utilisation de couches dites de *convolution* [LECUN et al. (1998)]. Celles-ci sont très prisées dans les applications des réseaux de neurones à l'analyse d'images. Elles consistent, dans un cas où les données d'entrée d'une couche ne sont pas des vecteurs (à une dimension) mais des matrices (à deux dimensions), à prendre des parties de cette matrice au lieu de considérer ses éléments un par un. La figure 3.33 illustre ce fonctionnement. Chaque neurone a alors accès à l'ensemble des morceaux de la (ou des) matrice d'entrée, la façon dont les « morceaux de matrice » sont construits pouvant varier. Ce procédé permet ainsi de considérer des considérations de proximité des éléments.

III.2.d. Une structure originale : du voisinage à la température d'un lieu

La température en un point dépend de son voisinage : la valeur en un lieu est principalement influencée par le profil urbain et la végétation des alentours plutôt que par les constructions plus distantes [45]. Il est donc plus cohérent de prédire la valeur de la température au centre d'une petite fenêtre.

Au lieu d'utiliser l'image complète en entrée du réseau de neurones, on utilise ainsi une fenêtre de plus petite taille (ici, 128 par 128 pixels) que l'on fait glisser, avec des pas horizontaux et verticaux prédéfinis, sur l'image. Le réseau de neurones

pour le test. Le premier ensemble sera envoyé avec *entrées* et *sorties* au modèle, tandis que les deux autres seront utilisés pour demander ses estimations au réseau et comparer celles-ci avec les valeurs réelles.

45. Cette approximation au premier ordre est surtout valide lorsque l'on s'intéresse aux températures relatives sur un territoire restreint comme c'est le cas de Bordeaux Métropole. Dans le cas contraire, si l'on s'intéresse à deux villes différentes dont on souhaite comparer les évolutions de température, il faudrait intégrer un biais géographique liées aux conditions climatiques distinctes.

est ensuite appliqué à chacune de ces fenêtres. Cette technique est fréquemment employée pour éviter d'avoir des réseaux de taille gigantesque, ce qui rendrait les phases d'entrainement et de test longues avec une machine normale (l'image de Bordeaux Métropole sortie de URBAN-SPATIALIZER est en effet de grande taille, 2780 par 2218 pixels).

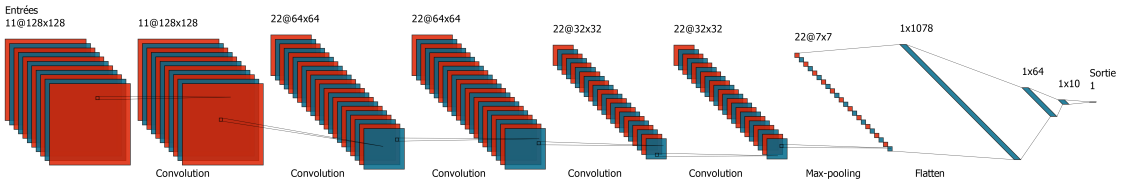


FIGURE 3.34 – Structure du réseau de neurones déployé après des essais de plusieurs structures distinctes.

Type de couche	Taille de couche	Taille de sortie	Taille de noyau du filtre	Pas de déplacement du filtre	Nb de params
InputLayer	11	(128, 128)	(5,5)	-	0
Conv2D	11	(128, 128)	(5,5)	-	3 036
Conv2D	22	(64, 64)	(5,5)	(2,2)	6 072
Conv2D	22	(64, 64)	(5,5)	-	12 122
Conv2D	22	(32, 32)	(5,5)	(2,2)	12 122
Conv2D	22	(32, 32)	(5,5)	-	12 122
MaxPooling2D	22	(7, 7)	(5,5)	-	0
Flatten	1	(1078)	(5,5)	-	0
Dense	1	(64)	(5,5)	-	69 056
Dense	1	(10)	(5,5)	-	650
Dense	1	(1)	(5,5)	-	11

FIGURE 3.35 – Schéma des couches successives retenues pour notre réseau.

L'utilisation de neurones de convolution permet également de prendre cette logique de proximité en compte dans notre réseau. Le principe des couches de convolution est que la valeur d'un pixel en sortie est calculée en appliquant un noyau de paramètres aux pixels environnants en entrée dont on peut faire varier la taille et les règles. Il est donc logique d'inclure de telles couches dans notre réseau car, combinées à des couches de *max pooling* qui réduisent la taille des sorties, elles vont nous permettre de simplifier étape par étape notre image de 128 par 128 pixels pour n'en obtenir qu'une seule valeur tout en gardant la logique d'influence des proximités.

En nous inspirant de la structure classique `U-Net` utilisée pour la ségmentation d'images médicales [RONNEBERGER et al. (2015)], le réseau le plus efficace dans notre cas est un modèle qui s'applique à une fenêtre carré [46] (128 pixels par 128 pixels) des 11 paramètres et qui estime la température au centre de cette fenêtre. Le tableau 3.35 et la figure 3.34 présentent la structure du réseau de neurones finalement retenu, appelé URBAN-TEMPÊST.

Chaque pixel correspond à un carré d'environ 412 m², soit d'un peu de plus de 20 m de côté. Les fenêtres de 128 pixels de largeur reviennent donc à considérer que

46. L'utilisation d'une fenêtre ronde est une perspective intéressante de développement.

la température en un point est influencée par les conditions urbaines à environ 1.3 km de proximité *a minima* et à 1.8 km *a maxima*.

III.3. Données d'entraînement, de validation et de test

Nous avons besoin de données pour entraîner, valider et tester notre modèle. Celles-ci peuvent être séparées en deux groupes : les entrées (ce que l'on sait) et les sorties (ce que l'on cherche à estimer).

III.3.a. Les paramètres urbains en entrée...

Plusieurs paramètres parmi ceux dont nous disposons sont pertinents au regard de la revue bibliographique précédente : la *proportion* et les *caractéristiques* de **végétation**, la *présence* et les *formes* de **bâtiments**, et les **routes**. Ces informations sont contenues dans les caractéristiques des archétypes de formes urbaines et de bâtiments déployés par TIMES-URBAN puis projetés spatialement. Nous disposons en outre de la valeur de ces données en 2014, notre année de référence, grâce au travail réalisé au chapitre 2 sur la récupération et le traitement des données d'IRIS.

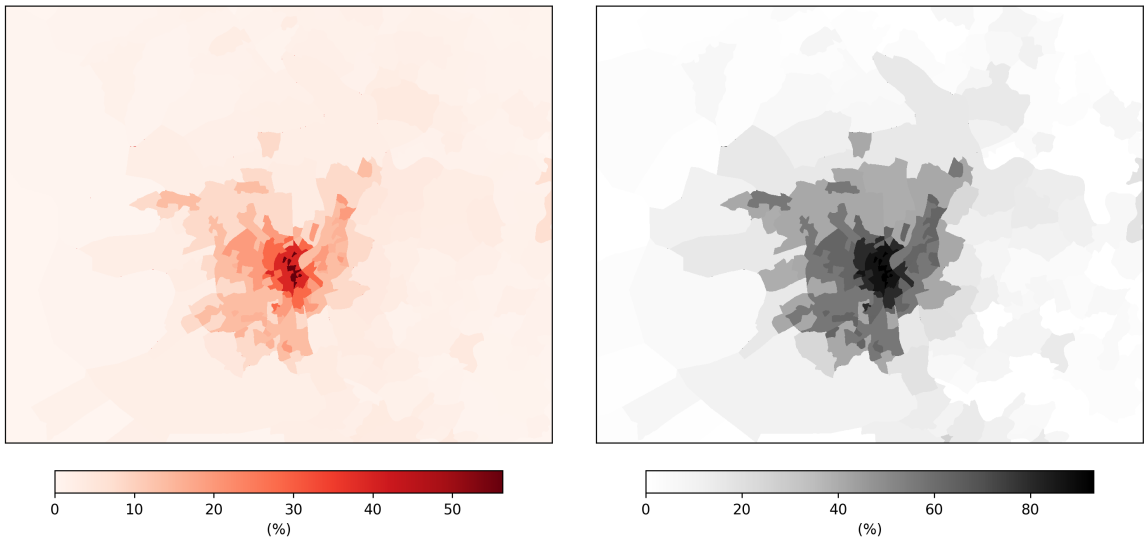
Les paramètres utilisés en entrée de notre réseau sont donc au nombre de 11 comme suit :

- pourcentage d'aire occupée par la *végétation* ;
- *hauteur maximale* des bâtiments dans l'aire considérée ;
- *hauteur moyenne* des bâtiments dans l'aire considérée ;
- pourcentage d'aire occupée par du *bâti* ;
- *volume* moyen des bâtiments ;
- *f-évapotranspiration* moyenne dans la zone ;
- *imperméabilité* moyenne dans la zone ;
- *pouvoir de refroidissement des arbres* moyen dans la zone ;
- *émissivité* moyenne dans la zone ;
- *longueur* occupée par les *routes* sur la surface totale ;
- proportion de surface occupée par les *routes*.

On obtient alors des cartes comme celles de la figure 3.36. La zone créée est légérement plus large autour de la métropole de Bordeaux.

III.3.b. ...et les données de température en sortie

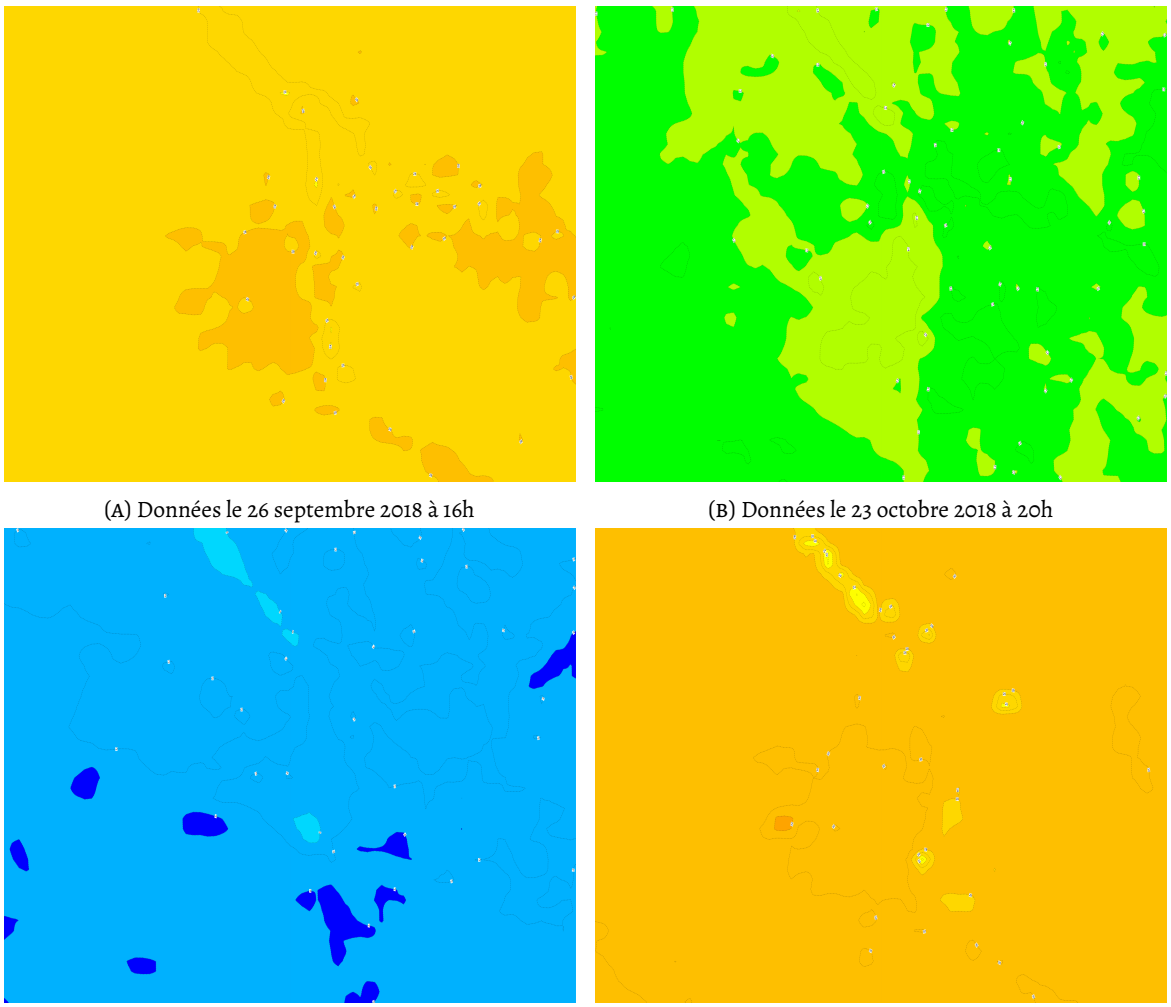
Ce que nous cherchons à obtenir de URBAN-TEMPÊST est une carte de la température du territoire. Obtenir des valeurs de température à une résolution fine à l'échelle de la métropole de Bordeaux n'est pas chose aisée : il existe des cartes de température à l'échelle du pays mais elles n'ont pas la précision suffisante pour permettre de visualiser des variations à l'échelle de notre territoire. Il est aussi possible d'utiliser un modèle climatique ou météorologique mais ceux-ci demandent une expertise et un ensemble de données d'entrée importants et qu'il était ardu de rassembler au cours d'un travail de thèse se concentrant sur la



(A) Proportion d'emprise au sol des bâtiments

(B) Proportion de terrain imperméabilisé

FIGURE 3.36 – Deux exemples de cartes parmi celles utilisées en données d'entrée pour l'entrainement du réseau de neurones.



(A) Données le 26 septembre 2018 à 16h

(B) Données le 23 octobre 2018 à 20h

(C) Données le 05 janvier 2019 à 8h

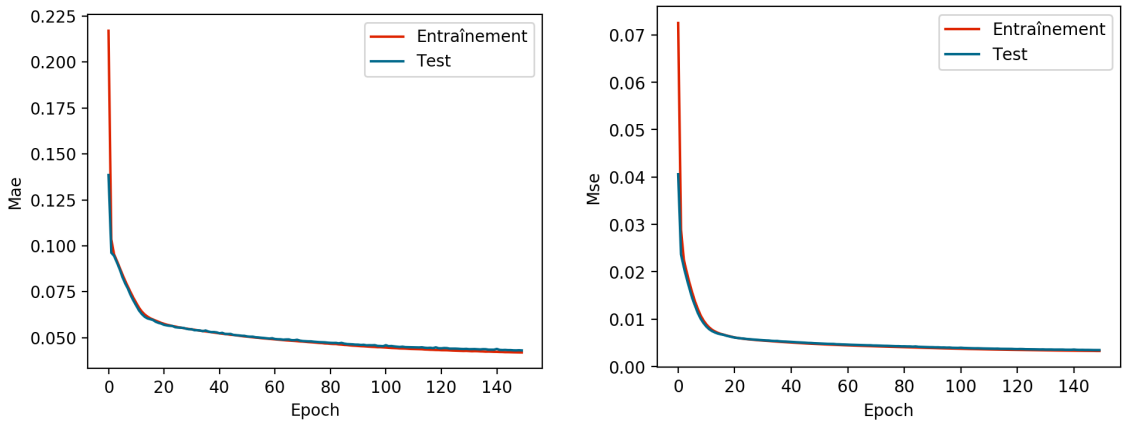
(D) Données le 14 juillet 2019 à 16h

FIGURE 3.37 – Cartes des températures de l'air à 2 mètres au-dessus du sol autour de la métropole de Bordeaux pour différentes journées en 2018 et 2019 (source : MétéoFrance). Les valeurs de température sont indiquées sur les lignes de niveau.

conception d'un modèle long terme sur l'utilisation des sols. En récupérant des cartes de résultats des modèles de Météo France, nous avons pu obtenir la température de l'air à 2 mètres au-dessus du sol par heure pendant l'année 2018 et une partie de 2019 [47]. Les cartes affichées sur la figure 3.37 sont quelques exemples choisis de telles données sur une fenêtre similaire que les cartes de paramètres de la figure 3.36.

III.4. Des résultats d'entraînement prometteurs

Les poids des neurones (les facteurs des combinaisons linéaires) sont initialisés aléatoirement et doivent être ajustés pour correspondre aux images testées, c'est-à-dire pour minimiser les écarts entre les prédictions et des sorties connues. L'adéquation statistique entre les températures prédites par le modèle et les températures réelles (de Météo France) est estimée pendant la phase d'entrainement en utilisant plusieurs indicateurs comme l'erreur absolue moyenne (ou *mean absolute error* ou M.A.E.) et l'erreur quadratique moyenne (ou *mean squared error* ou M.S.E.).



(A) Évolution du paramètre *Mean Absolute Error*.

(B) Évolution du paramètre *Mean Squared Error*.

FIGURE 3.38 – Évolutions de différents indicateurs de réussite de l'entrainement du réseau de neurones.

Indicateur	*Résultat (test)*
M.A.E.	0,0414
M.S.E.	0,0032
R^2	0,8395

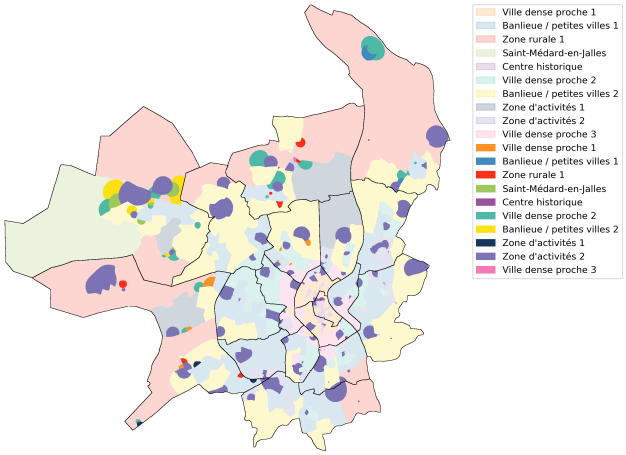
TABLEAU 3.9 – Résultats sur les données de test du réseau de neurones entraîné sur l'année 2014.

La figure 3.38 présente l'évolution de ces deux indicateurs lors de l'entrainement

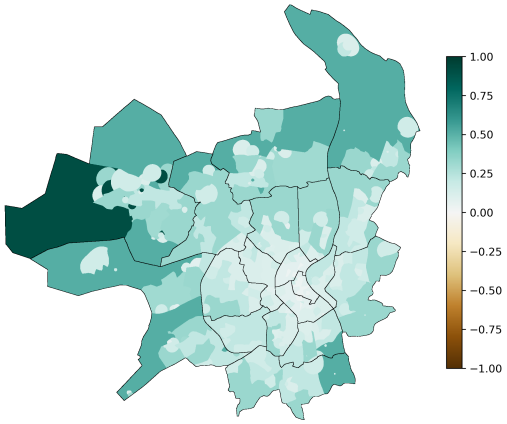
47. Il aurait été plus pertinent d'utiliser comme données d'entraînement la température à Bordeaux en 2014 et avant puisque c'est notre année de référence. Néanmoins, de telles données sont des données de réanalyse et après contact avec Météo France, l'obtention de telles données était payant et donc hors du cadre de notre étude qui souhaitait se limiter à une approche aussi « libre » que possible – c'est-à-dire utilisant des données *publiques*. En outre, cette étape étant la dernière étape de notre exercice, il ne nous a pas semblé capital, pour cette preuve de concept et cette première tentative, de disposer des données les plus pertinentes. Celles de 2018 étaient un moyen simple de valider notre méthodologie. Il serait bien sûr pertinent de travailler avec plusieurs années pour dresser une moyenne relative plus cohérente.

et de la validation de notre modèle, donnant des résultats corrects ($R^2 \geq 0{,}8$) : on constate que les erreurs sont faibles ($\ll 0{,}1$), et que l'entrainement et la validation convergent rapidement. Les estimations pour les données de test sont affichés dans le tableau 3.9. La méthode est donc efficace et l'entraînement pourrait être poursuivi sur un plus grand nombre d'itérations pour éventuellement obtenir un meilleur coefficient R^2.

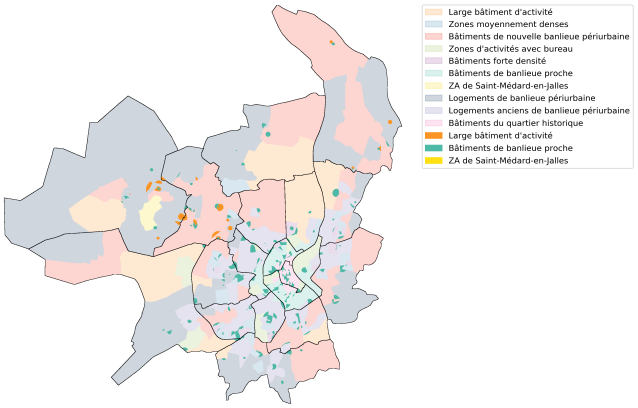
III.5. Ajustements des sorties de URBAN-SPATIALIZER pour l'application de URBAN-TEMPÊST



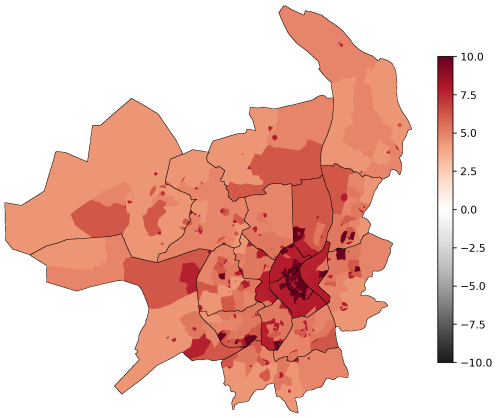
(A) Répartion des archétypes de formes urbaines sortant de l'étape de projection spatiale.



(B) Résultats de remplacement pour un paramètre des archétypes.



(C) Répartion des archétypes de bâtiments sortant de l'étape de projection spatiale.



(D) Résultats de remplacement pour un paramètre des archétypes.

FIGURE 3.39 – Transformation des sorties de TIMES-URBAN (droite) et deURBAN-SPATIALIZER (gauche) en cartes de paramètres utilisables par le réseau de neurones URBAN-TEMPÊST.

Pour passer des sorties de URBAN-SPATIALIZER présentées dans la section II à des données compatibles avec URBAN-TEMPÊST, on remplace les archétypes de formes urbaines ou de bâtiments par la valeur moyenne des paramètres correspondants. De la sorte, on s'assure de plusieurs choses, de la *cohérence* de l'« image » créée, mais surtout de la *validité des données* fournies en entrée du réseau de neurones. En effet, les réseaux de neurones sont de bons *estimateurs* tant que l'on reste dans les domaines de validité de son entrainement, c'est-à-dire que les données utilisées pour l'estimation ont des valeurs dans des intervalles similaires à ceux

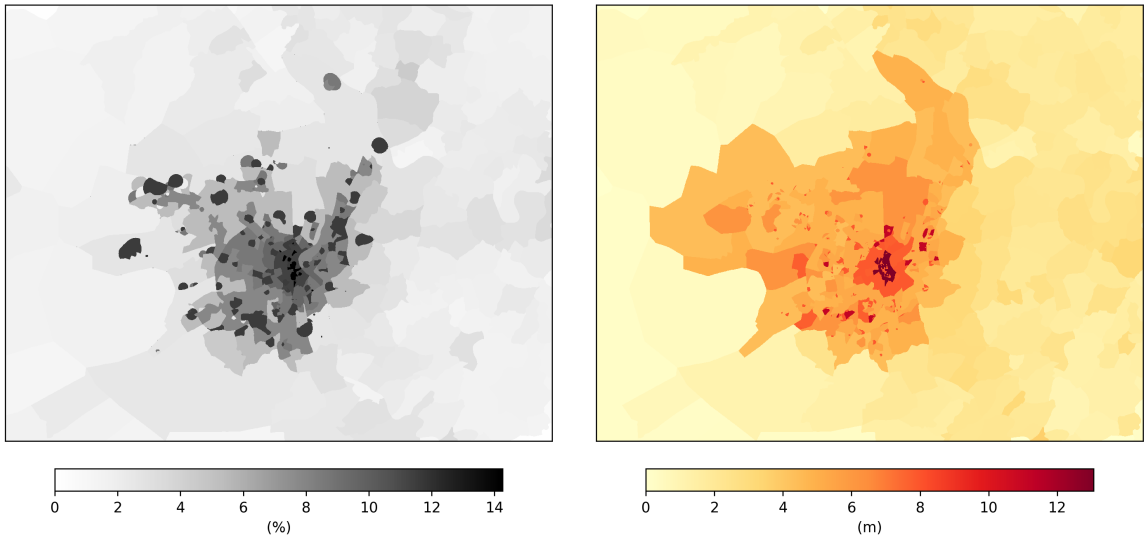
des données d'entrainement. Les cartes de la figure 3.39 affichent, pour la répartition des archétypes fournis par TIMES-URBAN et URBAN-SPATIALIZER, deux exemples de cartes de paramètres générées. On y remarque les conséquences des modifications effectuées au cours des années.

FIGURE 3.40 – Exemple de masque appliqué aux données de TIMES-URBAN projetée pour les compléter avec des informations sur les territoires extérieurs.

Une fois ce remplacement effectué, on dispose de onze images de la métropole pour chacun des paramètres. Pour permettre d'utiliser le principe de la fenêtre coulissante sur l'ensemble du territoire, il faut compléter ces images avec des données pour l'extérieur de la métropole et ainsi éviter des effets de bords. Nous utilisons pour cela les données de l'année de base, en stipulant donc que l'extérieur de la métropole n'a pas changé entre 2014 et 2050. Cette approximation, qui a des conséquences sur les pixels de la bordure extérieure de la métropole nous semble mineure puisque c'est bien le territoire de la métropole qui nous intéresse. La figure 3.40 révèle un des masques extérieurs de la métropole contenant les valeurs pour un des paramètres d'entrée du réseau de neurones. On obtient alors une image complète pour chacun des onze paramètres (voir figure 3.41).

IV. Conclusion

Pour conclure, nous avons construit, à partir des archétypes conçus au chapitre précédent, une chaîne de modélisation long terme complet constitué de trois briques indépendantes : un premier modèle qui s'appuie sur le framework MARKAL/TIMES appelé TIMES-URBAN, composé de deux secteurs (sols et transport) et permettant l'étude de scénarios d'occupation des sols ; un deuxième modèle d'optimisation et de distribution des modifications calculées par l'étape précédente, URBAN-SPATIALIZER, qui permet l'obtention d'une carte des archétypes à la fin de l'exercice de prospective ; enfin, grâce à une forme originale de réseau de neurones convolutifs, URBAN-TEMPÊST, une troisième et dernière phase convertit cette carte d'archétypes en carte de température. Tout au long de ce travail de modélisation, nous avons tenté de conserver à l'esprit les objectifs dé-



(A) Proportion de sol occupé par des routes

(B) Hauteur moyenne des bâtiments

FIGURE 3.41 – Données d'entrée du réseau de neurones dans des cas d'exemple en 2050.

crits dans le premier chapitre du présent document afin de s'assurer que nos choix, décisions, hypothèses et approximations correspondaient bien à ceux-ci et convenaient à l'exercice périlleux auquel nous tentons de nous prêter. Le dernier chapitre qui vient présentera l'utilisation de cette chaîne pour quelques scénarios prospectifs d'évolution de la métropole de Bordeaux.

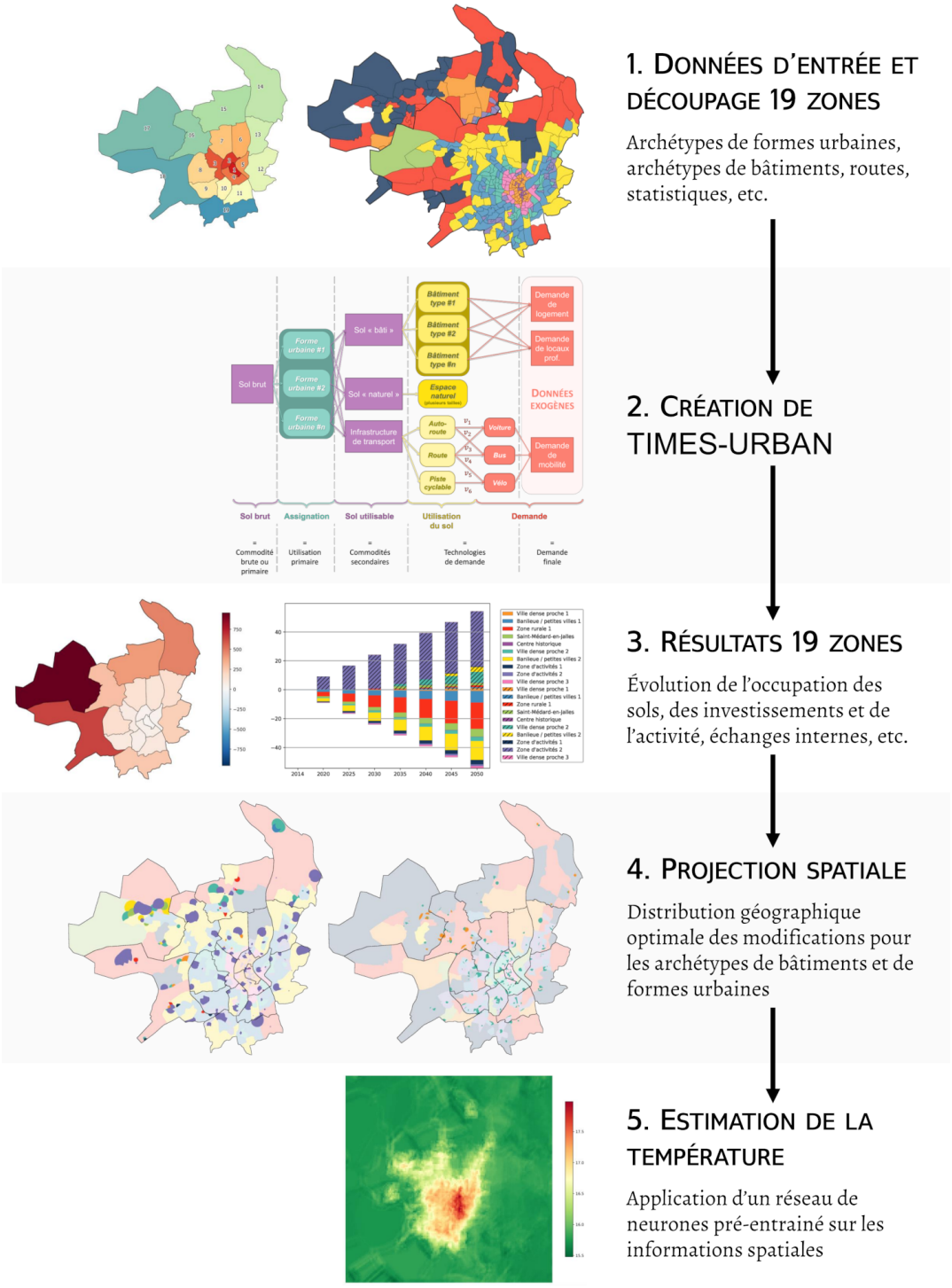
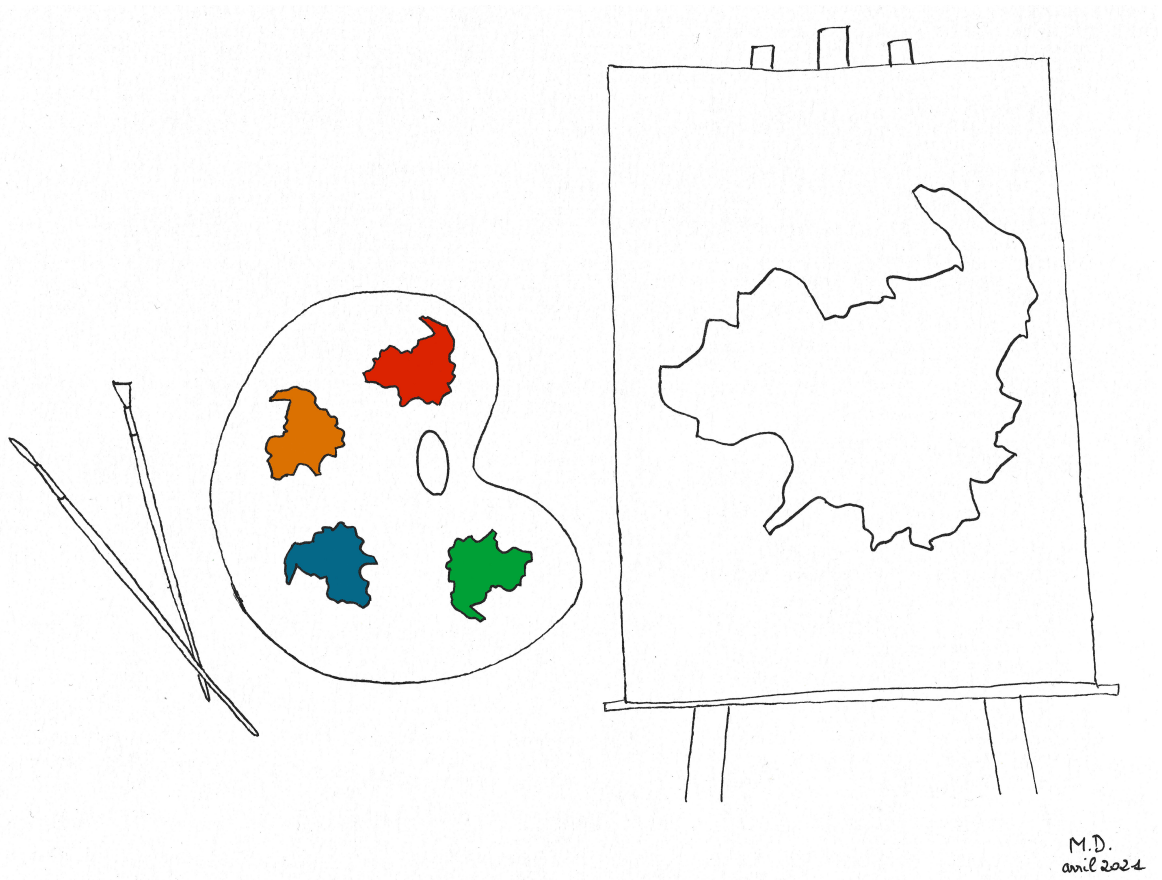


Figure 3.42 – Résumé de la méthodologie de modélisation.

Chapitre 4

Scénarios prospectifs de la ville



Où l'on dessine plusieurs trajectoires pour la métropole bordelaise...

Les deux chapitres précédents ont dessiné la *méthodologie de construction d'un modèle prospectif urbain* à partir d'archétypes statistiquement créés sur des données de la métropole bordelaise. Ce modèle, TIMES-URBAN, est ensuite complété par deux autres outils, l'un de *projection spatiale* mettant à contribution des cartes de contraintes, URBAN-SPATIALIZER, et l'autre d'*estimation de la température* qui utilise les caractéristiques révélées par la distribution géographique des changements ordonnés par le modèle prospectif et un réseau de neurones à convolution, URBAN-TEMPÊST.

Nous allons maintenant pouvoir mettre ces développements à profit pour revenir à notre objet d'étude et présenter quelques scénarios prospectifs d'évolution de la ville. Après avoir présenté dans la partie I la structure de notre scénario de référence et ses résultats, que nous utilisons comme base de comparaison, nous nous attarderons sur trois scénarios urbains :

- le scénario « population doublée » dans la partie II,
- le scénario « zéro artificialisation nette » dans la partie III,
- le scénario « densification autour des axes de transports en commun » dans la partie IV.

Nous étudierons alors les conséquences sur la température en 2050 dans la partie V avant de souligner les leçons de ces exercices prospectifs dans la partie VI.

STRUCTURE DE PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS PROSPECTIFS

L'élaboration d'un scénario prospectif sur la ville se fait en plusieurs étapes décrites pour chacune des propositions de ce chapitre et qui vont comme suit :

1. *Contexte* urbain, politique ou scientifique de l'étude ;
2. *Objectifs* du scénario (quels résultats s'attend-on à obtenir ?) ;
3. *Contraintes et développements spécifiques* réalisés pour ce scénario ;
4. *Résultats du scénario* :
   (a) en sortie de TIMES-URBAN, c'est-à-dire agrégés à l'échelle des 19 zones décrites dans la section I.1.a du chapitre 3 (voir page 177), et
   (b) en sortie de URBAN-SPATIALIZER ;
5. *Récit prospectif* pour la métropole de Bordeaux que nous pouvons tirer de ces éléments.

Un scénario est avant tout une situation dans laquelle est immergé le modèle, des conditions particulières dont on cherche à étudier les effets. L'exposé d'un scénario débute donc par le cadre explicatif avant la description des informations quantatives liées et des contraintes ajoutées selon la visée. On spécifie alors en particulier le niveau de demande finale, c'est-à-dire l'évolution de la population et des demandes en mobilité, lorsque celle-ci change par rapport au scénario de référence.

QUANT À LA LECTURE DES GRAPHIQUES ET DES CARTES PRÉSENTÉS

Plusieurs types de graphiques sont présentés dans la suite de ce document. Ils appartiennent globalement à trois catégories dont voici une description pour mieux les lire :

1. Les *histogrammes* sont calculés à partir des résultats (d'investissements, de productions…) du scénario considéré. On soustrait à ces résultats ceux d'une autre situation (l'année 2014 ou le scénario de référence généralement). Ils contiennent donc des colonnes verticales classées par périodes de cinq ou six ans (2015-2020, 2021-2025, 2026-2030, 2031-2035, 2036-2040, 2041-2045, 2046-2050) sauf pour l'année de référence qui est placée seule. Ces blocs d'histogrammes peuvent être au-dessus de l'axe des abscisses et représentent alors des objets *présents* dans le scénario étudié ; ils peuvent être également en-dessous du zéro et correspondent dans ce cas à des objets *absents* dans le scénario étudié comparativement à la trajectoire de référence. De la sorte, on voit ce qui n'a pas été utilisé et ce qui y a été remplacé dans la trajectoire optimale de TIMES-URBAN dans le scénario étudié. Enfin, les variables relatives aux nouveaux investissements vont être affichées avec des hachures de biais (ou un autre motif) tandis que les variables relatives aux objets préexistants en 2014 n'auront pas de motifs.
2. Les *cartes des 19 zones* de TIMES-URBAN : ces cartes sont soit la *somme* d'un paramètre (des investissements par exemple) soit constituées de la même façon que les histogrammes en effectuant la *différence* des résultats dans le scénario étudié par rapport aux résultats d'une situation référente. Les données y sont disponibles pour chacune des 19 zones.
3. Les *cartes de projection* de URBAN-SPATIALIZER qui affichent à une échelle plus fine les différences par rapport à l'année de référence.

Nous allons séparer les présentations des résultats du modèle, dans ce scénario de référence comme dans les suivants, entre sorties de TIMES-URBAN et celles de URBAN-SPATIALIZER. Les résultats de URBAN-TEMPÊST sont regroupés dans une section séparée à la fin du chapitre (voir section V, p. 301).

I. Présentation du scénario de référence

Dans toute analyse de scénarios, un scénario référent est nécessaire, à partir duquel réaliser les comparaisons. Ce scénario prolonge généralement les tendances actuelles, dessinant une situation où l'« on continue à faire de même » dans une trajectoire appelée scénario Base, qui correspond au scénario *Business as usual* (ou BAU en anglais) utilisé dans la communauté scientifique internationale.

I.1. La projection de la population de l'INSEE

	2014	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gironde (en milliers)	1 522	1 537	1 614	1 687	1 755	1 817	1 874	1 924	1 968
Facteur d'évolution	1,00000	1,00986	1,06045	1,10841	1,15309	1,19382	1,23127	1,26413	1,29304
Bordeaux (en milliers)	750	757	795	831	864	895	923	948	969

TABLEAU 4.1 – Tableau de la projection de l'évolution de la population du scénario central de projection de l'INSEE (Omphale 2017) et *estimation* pour la population de Bordeaux Métropole à partir de ces données.

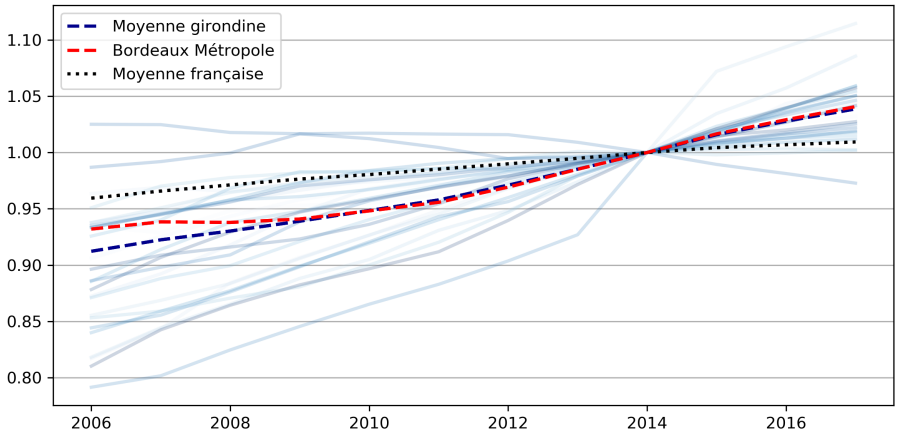


FIGURE 4.1 – Évolution de la démographie des principales intercommunalités girondines par rapport à la population de Bordeaux Métropole et aux moyennes départementale et nationale.

Dans notre cas, le scénario d'évolution démographique est celui où la population suit le scénario central de l'INSEE. Le tableau 4.1 affiche cette tendance entre 2014 et 2050. Il n'existe pas de projection pour la métropole bordelaise et nous avons donc utilisé les données concernant le département de la Gironde. Celui-ci rassemble 1 526 016 habitants d'après les estimations de l'INSEE au 1er janvier 2014 tandis que la métropole de Bordeaux compte 749 595 personnes, soit près de la moitié des Girondins. Étant donné le pouvoir d'attractivité des grandes villes [1], il n'est pas absurde de considérer que les chiffres se rapportant à la croissance démographique de la Gironde sont en large partie dus au développement de Bordeaux et qu'ils sont transposables à une étude long terme de la métropole bordelaise. La figure 4.1 valide ce constat avec une forte proximité des tendances démographiques de la Gironde et de la métropole bordelaise depuis le début de la décennie. Les autres valeurs (demandes de déplacements courte et longue

1. La figure 1.4b de la section I.2 du premier chapitre (voir page 9) montrait que les grandes villes étaient globalement au-dessus de la dynamique française avec une croissance plus marquée.

distance, contraintes sur les budgets temps, logements, écoles, etc.) sont ensuite indexées sur cette évolution.

Zone	Part de la population totale de la métropole (%)
BDX01	4,842
BDX02	7,408
BDX03	7,396
BDX04	7,526
BDX05	2,175
BDX06	3,154
BDX07	5,358
BDX08	8,302
BDX09	5,194
BDX10	5,539
BDX11	4,369
BDX12	6,732
BDX13	4,671
BDX14	2,790
BDX15	3,098
BDX16	5,504
BDX17	4,765
BDX18	4,715
BDX19	6,464

TABLEAU 4.2 – Répartition de la population entre les différentes zones de TIMES-URBAN

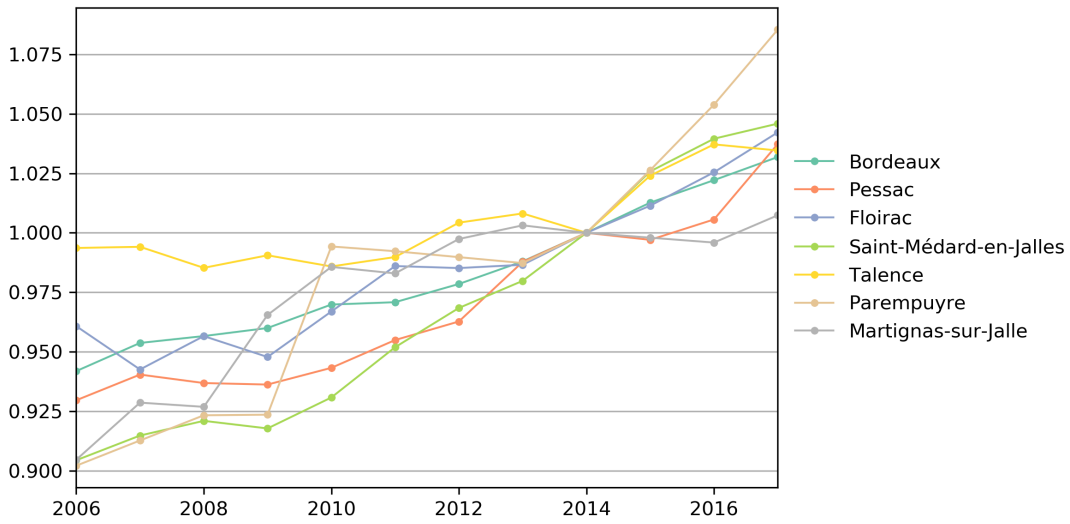


FIGURE 4.2 – Comparaison des évolutions démographiques de quelques villes au sein de Bordeaux Métropole. La valeur en 2014 est prise comme référence pour le calcul des valeurs relatives.

La répartition des évolutions parmi les 19 zones spatiales de notre modèle suit quant à elle la situation de 2014, c'est-à-dire que la proportion de population par zone par rapport à l'ensemble de la métropole reste constante au cours du temps. Quand on regarde l'évolution de quelques villes (voir figure 4.2), la progression est plus variable que cette moyenne peut le laisser supposer avec des écarts importants entre les villes. Néanmoins, à défaut d'avoir des scénarios de projection à une échelle plus fine que celle du département, utiliser les clés de

répartition de l'année 2014 pour la distribution entre les zones est une bonne première approximation pour les tendances locales.

I.2. Les contraintes de référence

Nous avons déjà présenté les contraintes définies dans TIMES-URBAN dans la section I.3 du chapitre 3. Certaines d'entre elles sont activées par défaut dans notre scénario de référence et sont communes, sauf mention contraire à l'ensemble des scénarios qui seront présentés par la suite. En voici la liste :

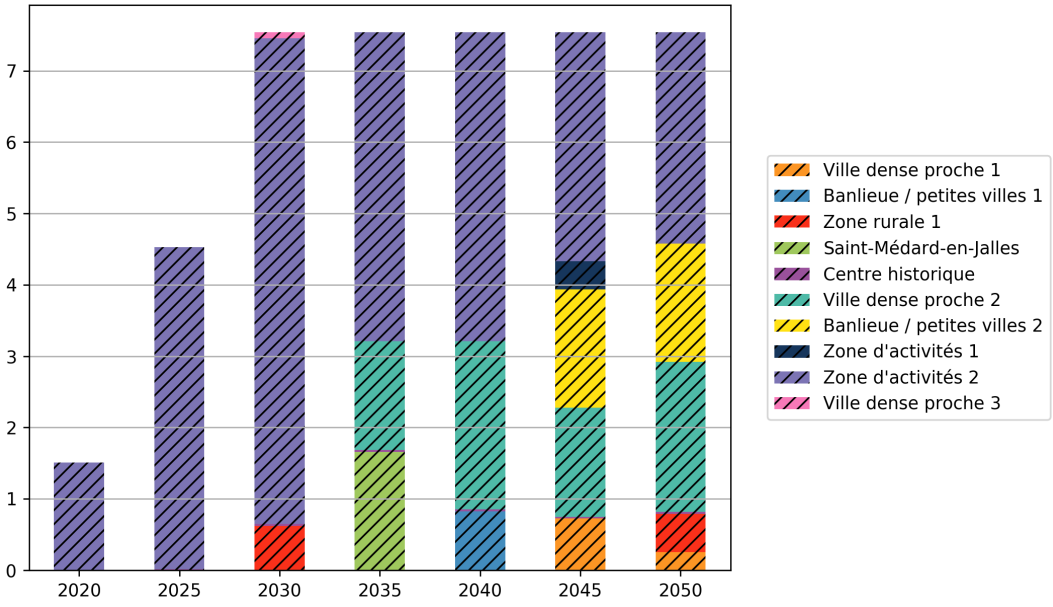
- Ajout d'un coût par m^2 aux bâtiments,
- Limitation des formes de bâtiments trop spécifiques (centre historique),
- Limitation des formes urbaines trop spécifiques (base militaire et Saint-Médard-en-Jalles),
- Limitation de la construction de tours,
- Limitation de la transformation des bureaux vacants,
- Limitation de la surface totale,
- Échanges d'emplois entre les différentes zones.

I.3. Résultats du scénario de référence

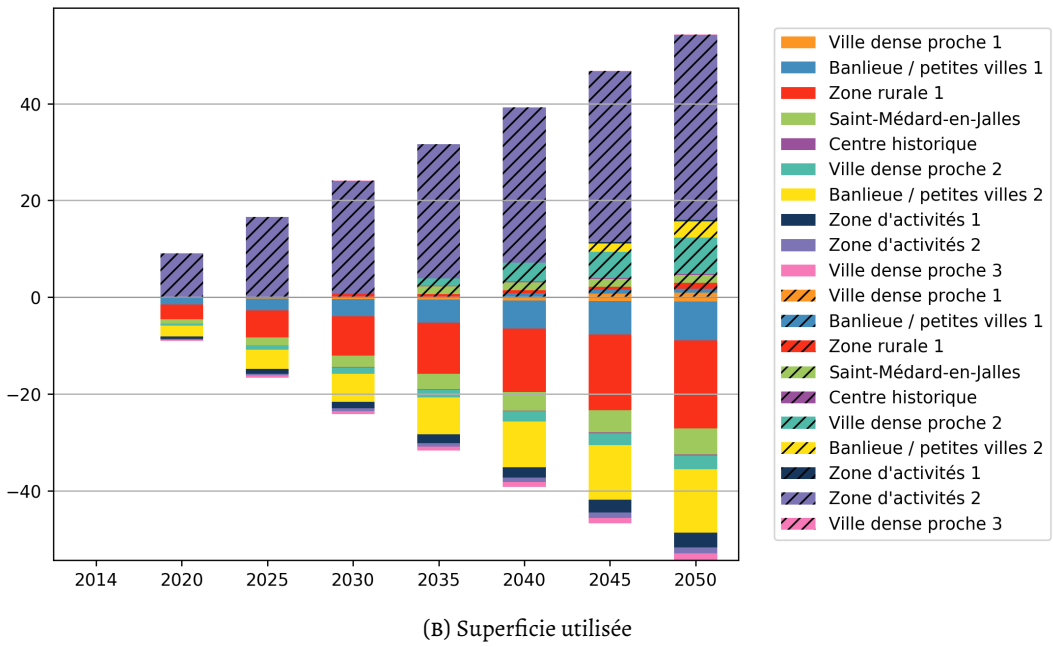
I.3.a. En sortie de TIMES-URBAN

Tout d'abord, on peut remarquer que le modèle parvient à fournir la demande finale en logements et en emplois. Nous allons voir que cette réponse est liée à une réaffectation assez large des sols et à des investissements importants dans la construction de bâtiments.

Occupation du sol



(A) Nouveaux investissements



(B) Superficie utilisée

FIGURE 4.3 – Investissements et différences dans l'évolution de l'utilisation des sols du scénario Base par rapport à l'année de référence (en km²).

Process	Ville dense proche 1	Banlieue / petites villes 1	Zone rurale 1	Saint-Médard-en-Jalles	Centre historique	Ville dense proche 2	Banlieue / petites villes 2	Zone d'activités 1	Zone d'activités 2	Ville dense proche 3
BDX01	-	-	-	-	0,099	-	-	-	0,151	-
BDX02	-	-	-	-	0,048	-	-	-	0,451	-
BDX03	-	-	-	-	-	-	-	-	1,010	-
BDX04	-	-	-	-	0,038	-	-	-	0,644	-
BDX05	-	-	-	-	-	-	-	-	0,476	-
BDX06	-	-	-	-	-	-	-	-	1,498	-
BDX07	0,251	-	-	-	-	-	-	-	1,553	-
BDX08	-	-	-	-	-	-	-	-	2,004	-
BDX09	-	-	-	-	-	-	-	-	1,198	-
BDX10	-	-	-	-	-	-	-	-	0,834	-
BDX11	-	-	-	-	-	-	-	-	1,302	-
BDX12	-	-	-	-	-	-	-	-	2,865	-
BDX13	-	-	-	-	-	-	-	-	2,029	-
BDX14	-	0,826	-	-	-	2,477	-	-	2,642	-
BDX15	-	-	0,619	-	-	2,805	-	-	1,543	0,083
BDX16	-	-	-	-	-	-	-	-	3,627	-
BDX17	-	-	-	1,658	-	1,658	3,316	-	5,306	-
BDX18	0,723	-	0,537	-	-	0,579	-	0,393	5,804	-
BDX19	-	-	-	-	-	-	-	-	3,257	-

TABLEAU 4.3 – Répartition des investissements (en km²) cumulés en nouveaux archétypes en 2050 dans le scénario de référence.

Le modèle investit principalement (voir figure 4.3a) en termes de superficies dans la forme *Zone d'activités 2* et ce de façon relativement répartie dans la métropole comme le montre le tableau 4.3. Le reste des investissements se répartit surtout entre *Ville dense proche 2* à partir de 2035 dans les zones périphériques, *Saint-Médard-en-Jalles* en 2035 et *Banlieue / petites villes 2* à partir de 2045 dans la seule zone BDX17. Quelques surfaces (moins de 1 km² à chaque fois) sont dédiées aux archétypes *Zone rurale 1* (2030 et 2050), *Banlieue / petites villes 1* (2040), *Ville dense proche 1* (2045 et 2050). Comme le montre la figure 4.3b, ces investissements perdurent et contribuent à changer près de 54 km² en 2050 par rapport à 2014 [2]. Les sols qui voient leur occupation changer sont donc majoritairement occupés par un archétype finalement assez peu bâti (à 14.7 % environ) mais aussi par des archétypes très denses (38.6 % environ pour *Ville dense proche 1* et 19.3 % environ pour *Ville dense proche 2*).

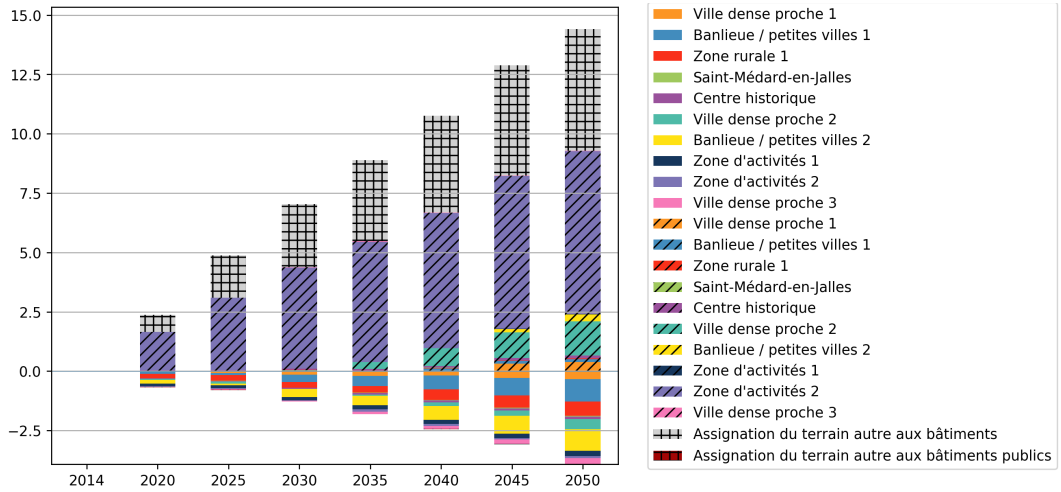


FIGURE 4.4 – Production de terrain bâti selon les archétypes.

2. On pourra s'étonner, dans cette figure, de la différence entre la surface utilisée et les investissements réalisés en 2020 par TIMES-URBAN : cette différence est due à l'absence sur les graphiques des années intermédiaires pourtant bien présentes dans le modèle, à savoir 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021 et 2022. Les investissements cumulés de ces années absentes permettent la production de plus de 7,5 km² là où l'année 2020 seule montrait un investissement de l'ordre de 1.5 km².

Ces nouveaux investissements augmentent globalement la production de terrains bâtis dans toute la métropole dont la figure 4.4 dresse la répartition selon les archétypes. On peut tout d'abord noter que là où les investissements correspondaient à un changement de formes urbaines, de nouveaux archétypes en remplaçant d'anciens sur une même superficie [3], les changements d'affectation des sols sont bien plus importants dans les détails : dans ce scénario `Base` où aucune contrainte autre que la minimisation du coût global actualisé ne pousse *a priori* le modèle à ne pas artificialiser ou à moins bâtir, on constate en effet que 14.4 km² sont affectés au bâti par les nouveaux archétypes tandis que seulement 3,9 km² de terrain affecté au bâti en 2014 sont retirés. Cela signifie que les formes urbaines investies dans la trajectoire de TIMES-URBAN au fur et à mesure des années dédient plus de surface au bâti que celles qu'elles ont remplacées. On peut également remarquer qu'une part importante du terrain bâtissable est obtenue par transformation du sol catégorisé comme *autre* en sol *bâti*. Cela correspond à un peu plus de 5 km² en 2050 par rapport à 2014.

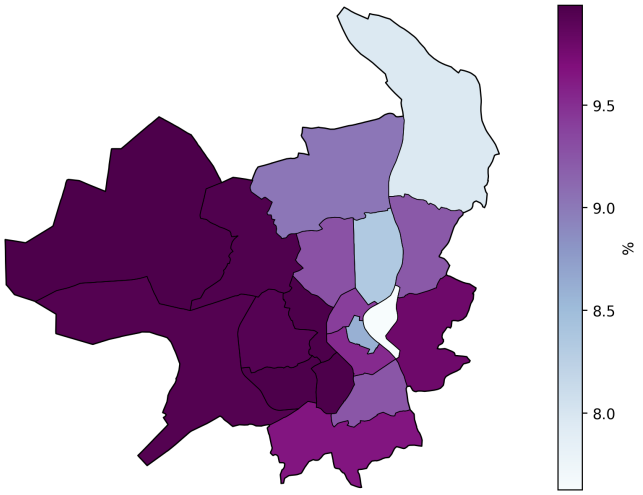


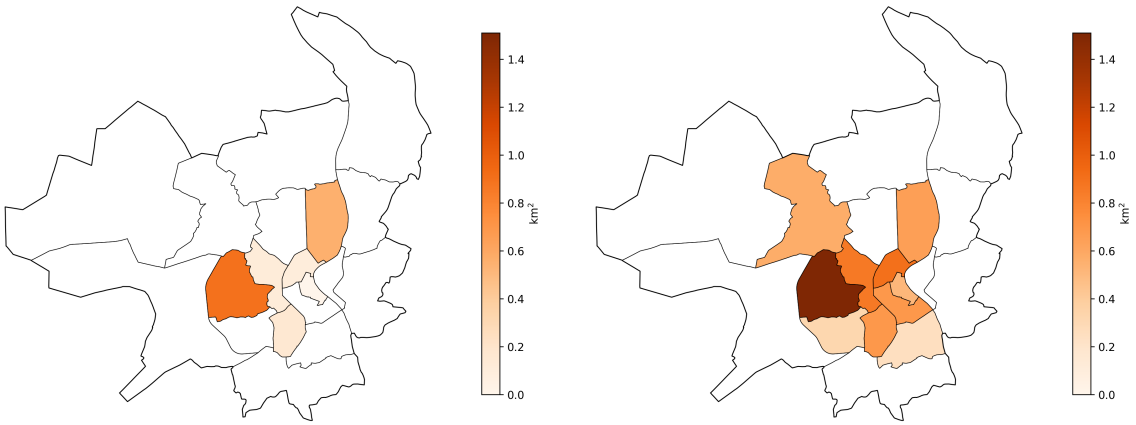
FIGURE 4.5 – Répartition des changements d'archétypes pour chacune des zones de TIMES-URBAN dans le scénario `Base` par rapport à l'année de référence (2014).

Au niveau de la distribution géographique des changements, quand on considère la somme des modifications à l'échelle de la métropole (cf. figure 4.5), on remarque que les investissements en nouvelles formes urbaines touchent tout le territoire, dans une intensité proportionnelle à la superficie des zones : toutes les zones de TIMES-URBAN voient 9,34 % (0,73) de leur superficie modifiée [4].

Quand on regarde la répartition géographique de la conversion des sols de type *autre* (voir figure 4.6), on remarque que ce sont plutôt les zones du centre de la métropole qui sont les plus touchées (Le Haillan, Eysines, Le Taillan-Médoc, Talence, Pessac en moindre mesure, mais surtout l'ouest de Bordeaux et l'est de Mérignac). Cette tendance est généralisée spatialement entre 2014 et 2050 : là où seules 6 zones étaient concernées en 2014, elles sont 10 en 2050. Cela reste toutefois des surfaces relativement faibles par zones, avec 1.51 km² maximum

3. Cela est visible par le fait que le graphique 4.3b est équilibré, les terrains produits par les nouveaux investissements remplaçant une partie des archétypes existant à l'année de référence, c'est-à-dire qu'il ne s'agit que de *changer* l'occupation d'un terrain (et non de créer des nouvelles surfaces). TIMES-URBAN fonctionne à surface donnée, sans pousser les limites de la métropole.

4. Cela se comprend par la grande symétrie du problème, les variations mineures étant fournies par les possibilités d'échanges inter-zones.



(A) 2014 (B) 2050

FIGURE 4.6 – Répartition de la conversion de terrain *autre* pour chacune des zones de TIMES-URBAN dans le scénario Base en 2014 et 2050.

pour une zone (BDX08).

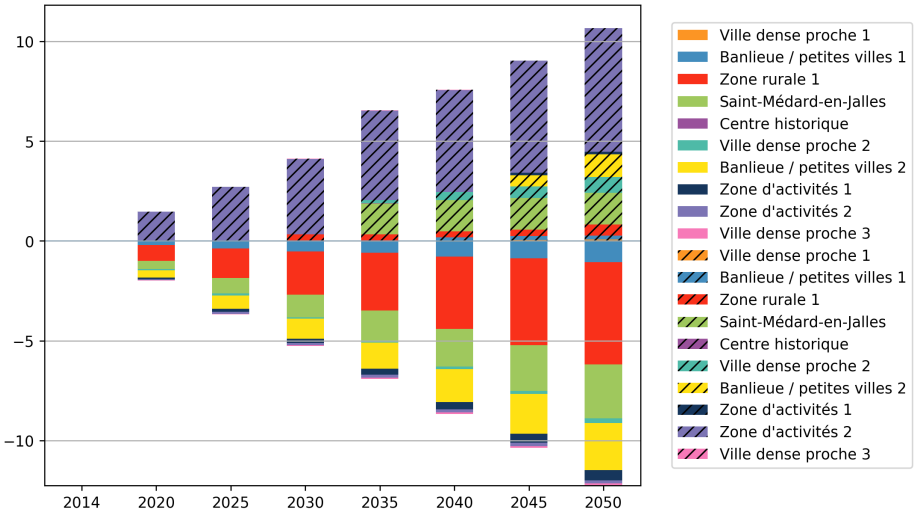
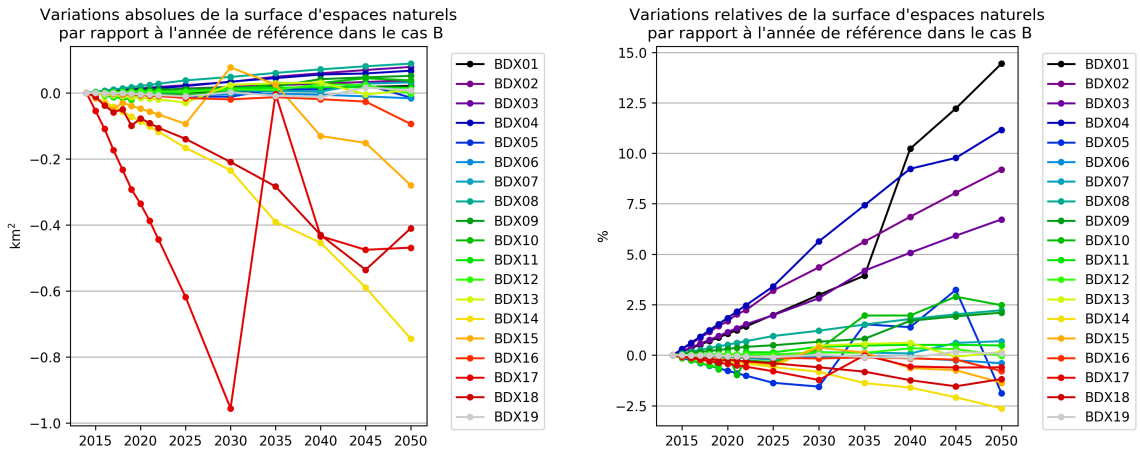


FIGURE 4.7 – Production d'espaces naturels dans le scénario Base en 2050 par rapport à 2014.

L'étude de la production d'espaces naturels sur le territoire montre que les valeurs sont à peu près équilibrées avec une légère baisse en 2050 : les nouveaux investissements conduisent à remplacer 12.25 km² de surface occupée par de la verdure par 10.66 km², ce qui correspond à une perte d'environ 1.59 km². On peut noter que ce sont principalement les zones rurales et l'archétype *Saint-Médard-en-Jalles* qui portaient la verdure qui ont disparu en 2050 et qu'ils ont été remplacées par les archétypes *Zone d'activités 2* (qui fournit 6.20 km² d'espaces naturels pour une surface totale occupée de 38.19 km²), *Saint-Médard-en-Jalles* et *Banlieue / petites villes 2*, archétypes moins « verts » (voir figure 4.7).

Une étude géographique des modifications, fournie par les courbes de la figure 4.8, montre que ce sont bien les zones extérieures de l'ouest de la métropole (BDX15 et suivantes) qui voient la plus grande baisse annuelle en absolu (voir figure 4.8a). En relatif toutefois (voir figure 4.8b), on constate que les zones intérieures denses de la ville de Bordeaux (BDX01 à BDX04) voient des augmentations importantes (allant jusqu'à 15 % en cumulé) de leurs surfaces d'espaces natu-



(A) En absolu (B) En relatif

FIGURE 4.8 – Évolution de la surface d'espaces naturels par rapport à l'année de référence 2014 pour l'ensemble des 19 zones pour le scénario `Base`.

rels en 2050 par rapport à 2014. Il faut nuancer cette conclusion en remarquant (figure 4.8a) que les superficies en jeu sont très faibles, conduisant à des augmentations cumulées de moins de 0.2 km² en 2050, soit moins de 20 hectares sur toute la période considérée (pour `BDX01–04` par exemple).

Bâtiments

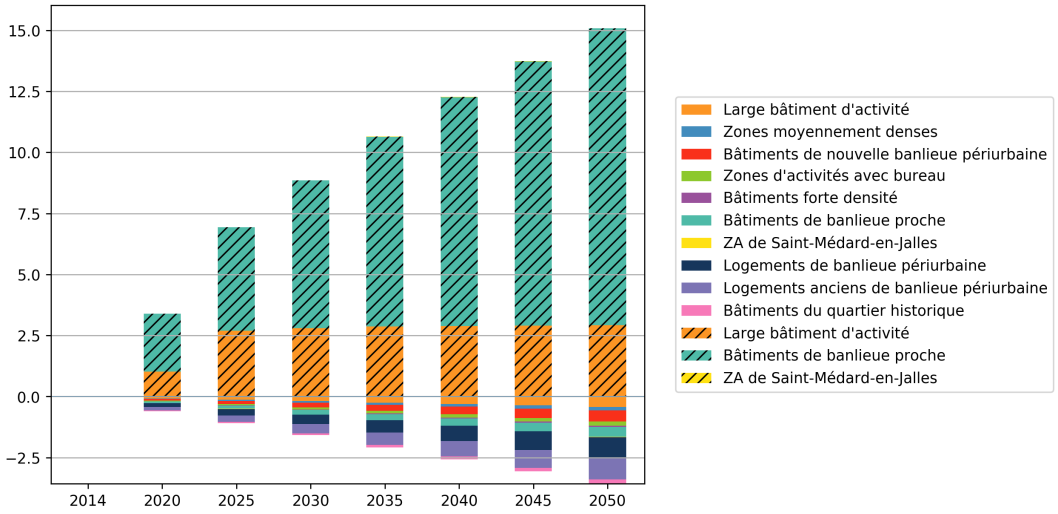
La figure 4.9 présente les résultats de nouveaux investissements pour le logement de la population jusqu'en 2050 par rapport à la situation de 2014. On y constate l'installation de 15.08 km² de bâtiments en remplacement de seulement 4,02 km² d'anciens archétypes (voir figure 4.9a). L'augmentation de la surface de terrain bâti est finalement tirée par l'augmentation de la demande en logements elle-même tirée par l'augmentation de la population. Chaque zone voit une faible partie de ses bâtiments changer et les personnes supplémentaires sont majoritairement logées, d'après la figure 4.9b, dans des bâtiments de l'archétype *Bâtiments de banlieue proche* qui accueillent la croissance démographique de 300 000 habitants prévue par le scénario de demande finale. Ces bâtiments sont installés sur environ 12.16 km². Ces investissements sont complétés par 2.92 km² de l'archétype *Large bâtiment d'activité* qui accueille plutôt des locaux d'activité que des logements, formant ensemble les 15.08 km² mentionnés précédemment.

Si l'on considère uniquement l'archétype *Bâtiments de banlieue proche*, que l'on prend comme taille moyenne d'un logement 61 m² [5] et 2.2 le nombre de personnes dans un foyer, on obtient 133 000 logements d'ici à 2050 pour 9.169 km² de surface bâtie pour le logement [6], soit 44 300 tous les quinze ans environ. Ce chiffre paraît important de prime abord, mais est similaire au plan *50 000 logements pour Bordeaux* en 2030, encore plus ambitieux que les tendances du scénario central de l'INSEE [7].

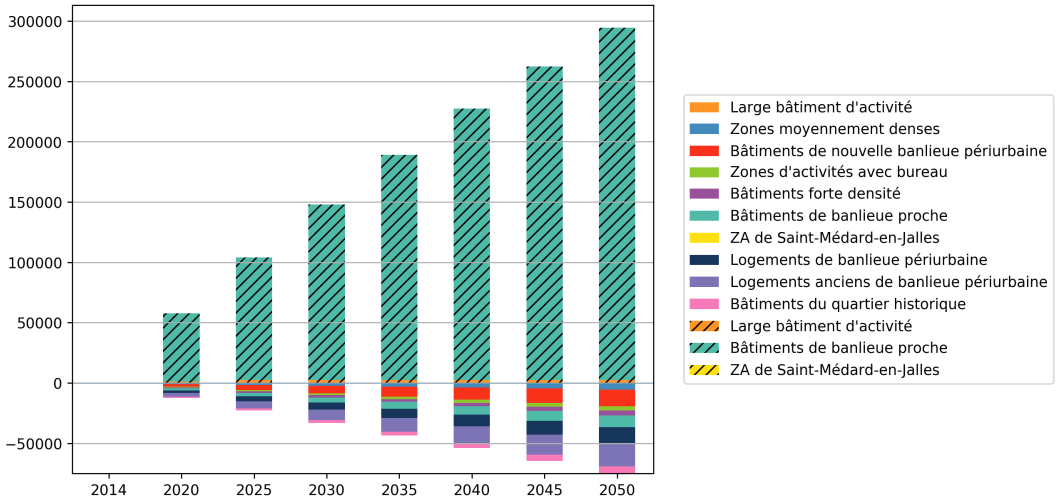
5. Il s'agit de la valeur calculable à partir des caractéristiques d'emprise, de rapport entre surface bâti et surface habitable, et le nombre d'étages moyen de ces bâtiments (voir chapitre 2, section IV p. 146).

6. L'archétype emploie en effet 75.41 % de ses 12.16 km² de terrain bâtissable pour du logement et le reste pour de l'activité.

7. À titre de comparaison, on peut regarder la construction de logements à Paris par exemple.

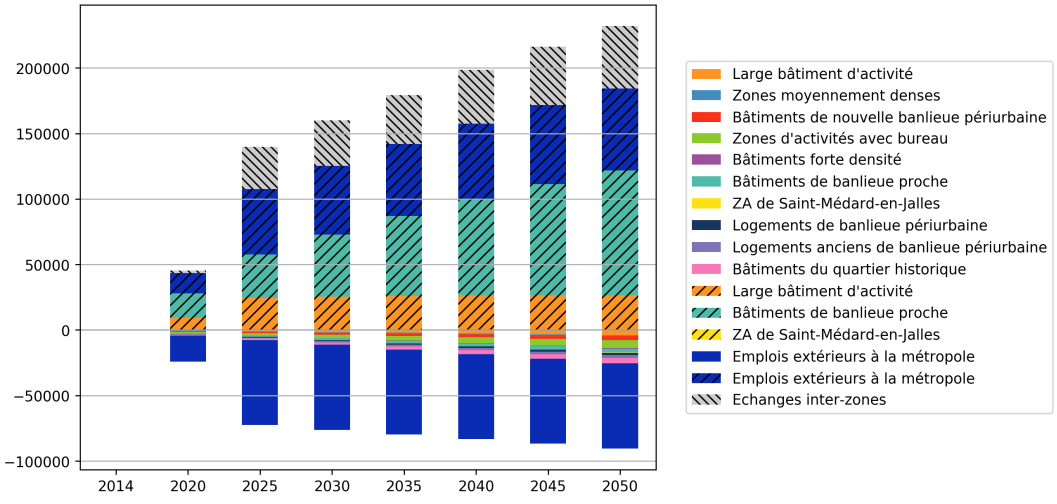


(A) Nouveaux investissements

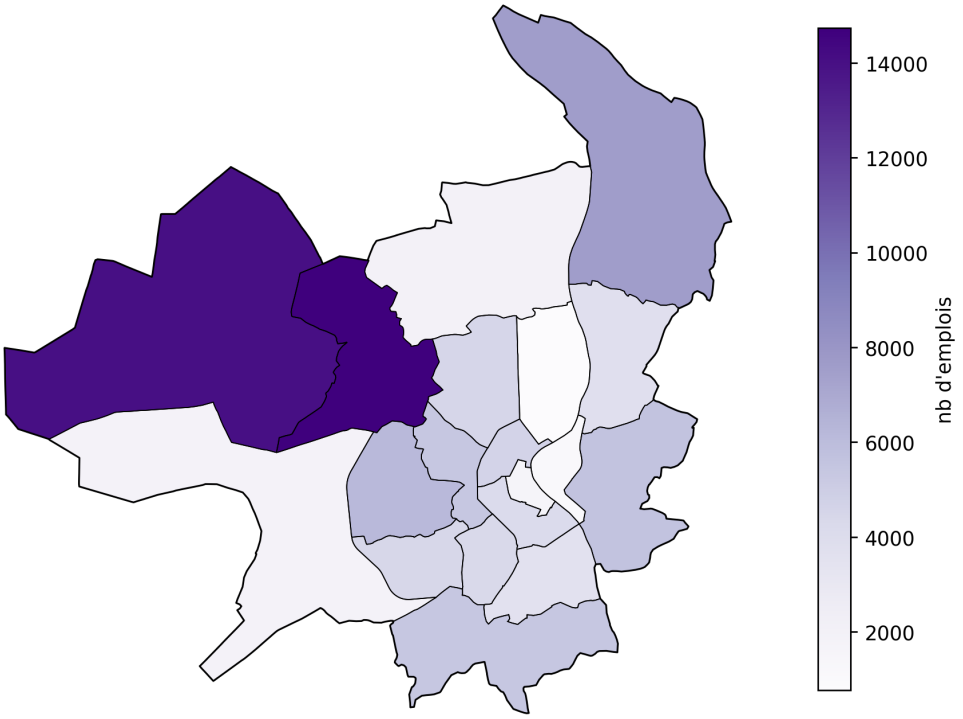


(B) Superficie utilisée

FIGURE 4.9 – Investissements et différences dans l'évolution des bâtiments du scénario `Base` par rapport à l'année de référence (en km²).



(A) Variations en nombre d'emplois



(B) Répartition géographique

FIGURE 4.10 – Évolution et répartition géographique des emplois fournis par les archétypes de bâtiments.

Quand on se penche plus précisément sur les emplois (voir figure 4.10a), on peut constater que TIMES-URBAN fait appel à des emplois extérieurs à la métropole pour parvenir à répondre à la demande finale. Ce niveau d'« importation » reste toutefois globalement stable à partir de 2025. Il est complété par les emplois rendus possibles par les bâtiments construits sur les terrains bâtis. Géographiquement, toute la métropole est modifiée par une hausse des emplois proposés de l'ordre d'au moins quelques milliers en 2050 par rapport à 2014, comme le montre la figure 4.10b. Ce sont spécifiquement les zones où se développe l'archétype de bâtiments *Large bâtiment d'activité*, c'est-à-dire les zones du nord et du nord-ouest.

Des échanges entre les zones ont lieu pour équilibrer celles qui ont plus d'emplois que les besoins de leur population et inversement. Les graphiques 4.11a et 4.11b tracent les échanges en réception et en envoi de tels emplois. On peut remarquer tout d'abord que ce sont les zones BDX01, 03–06, 08, 09, 10, 11 qui envoient principalement des emplois, c'est-à-dire *vers lesquelles* les habitants de la métropole se déplacent pour travailler, et les zones BDX07, 11–13, 15 et 18–19 qui reçoivent, c'est-à-dire *desquelles* les habitants de la métropole partent pour aller travailler ailleurs. Les zones plus denses du cœur de la métropole sont excédentaires en postes professionnels tandis que les zones périphériques ont plutôt des emplois externes, c'est-à-dire que les habitants de ces zones se déplacent pour travailler.

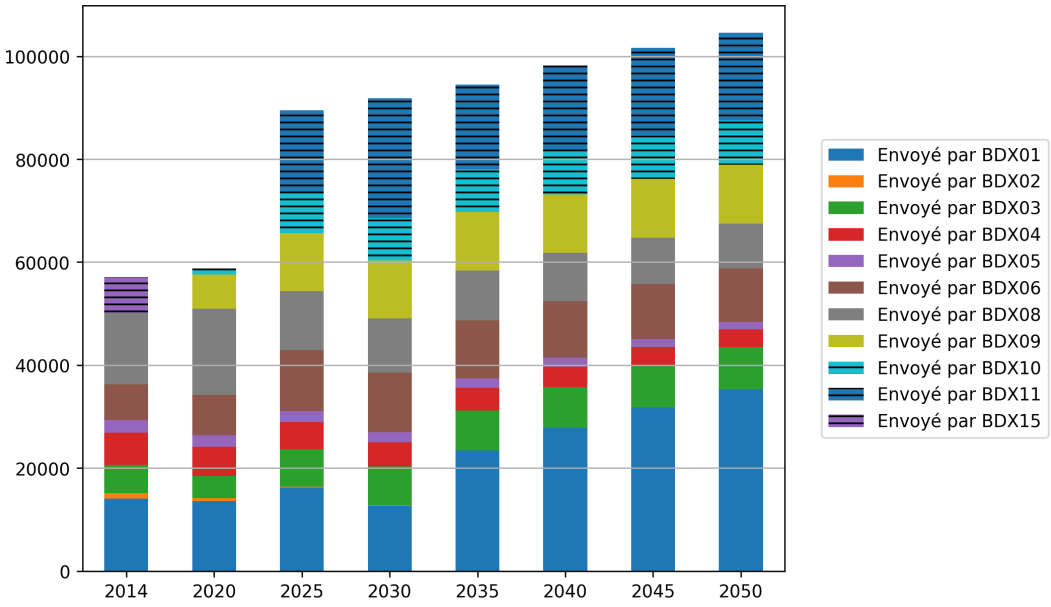
Premières conclusions

Ces premiers éléments de TIMES-URBAN sur le scénario de référence fournissent déjà des conclusions intéressantes sur le développement futur de la métropole dans un cas simple de *Business as usual*. Ce scénario de base trace une trajectoire ambitieuse, avec 700 hectares de sols modifiés et la construction de plusieurs dizaines de milliers de m² de bâtiments tous les cinq ans sur l'ensemble de la métropole. Ces changements augmentent drastiquement la surface de terrain occupée par du bâti et sont combinés à une réaffectation croissante des sols *autres* vers des sols *bâtis*. Les archétypes présents permettent notamment plus de souplesse puisqu'ils comportent des surfaces de type *autre* qui peuvent être réaffectées au fur et à mesure des années à des logements ou locaux d'activité quand le besoin s'en fait ressentir. On peut remarquer que TIMES-URBAN utilise une assez grande variété d'archétypes, à des niveaux plus ou moins forts (environ 1 km² pour la *Ville dense proche 1* ou la forme *Banlieue / petites villes 1* contre 38.19 km² pour l'archétype *Zone d'activités 2*) mais que la réponse ne s'est pas concentrée sur une seule forme urbaine.

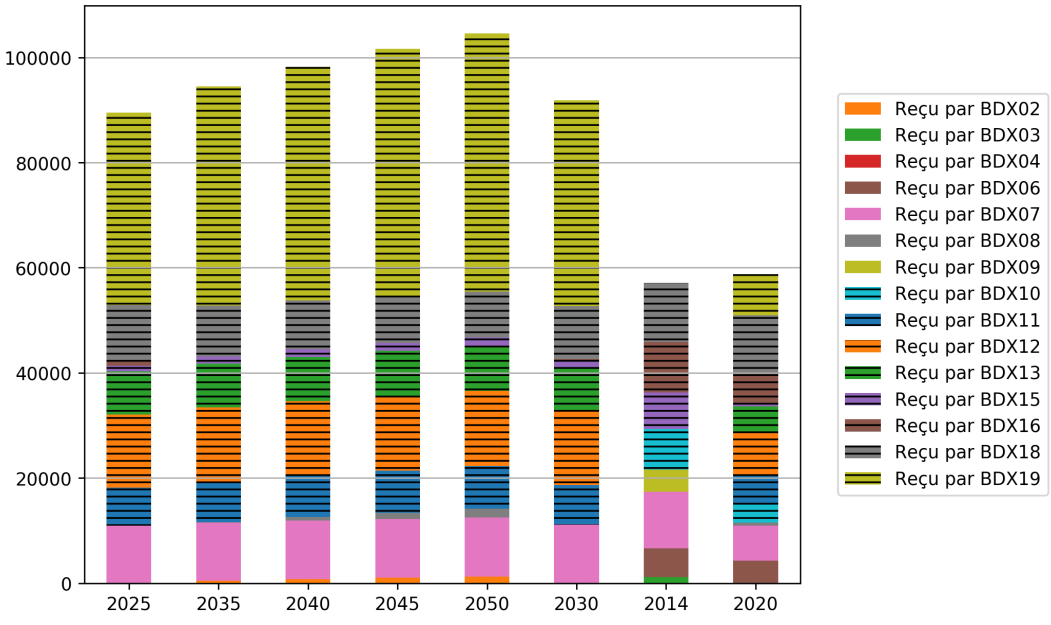
Au niveau des espaces naturels, on constate une baisse légère de la surface dédiée à la nature, principalement au détriment des *Zones rurales*, renforçant par là la réflexion à avoir sur la compétition autour du foncier en milieux périurbains.

Les surfaces bâtissables sont quant à elles occupées principalement par deux

Si on regarde la *Communauté d'agglomérations Paris-Saclay*, environ 29 000 logements ont commencé à être construits entre 2000 et 2016 d'après les données *Sit@del2* alors que cette intercommunalité regroupait moins de 350 000 habitants. De même, les établissements publics territoriaux *Paris Ouest La Défense* (environ 550 000 habitants en 2016) et *Grand-Orly Seine Bièvre* (environ 700 000 habitants en 2016) ont vu le commencement des chantiers de 34 000 et 56 000 logements respectivement entre 2000 et 2016, soit en une quinzaine d'années.



(A) Envois d'emplois



(B) Réceptions d'emplois

FIGURE 4.11 – Échanges d'emplois en valeurs absolues (en nombre d'emplois) au sein de la métropole dans le scénario Base.

archétypes de bâtiments en plus des bâtiments existants. Les autres archétypes de bâtiments ne sont pas employés : sont-ils trop peu efficaces en densité ? Trop chers ? Ou peut-être la mixité légère (75 % de logements et 25 % de locaux d'activité) proposée par l'archétype *Bâtiments de banlieue proche* (qui correspond plutôt à des petits immeubles R+2) associée à l'ultra-spécialisation de l'archétype *Large bâtiment d'activité* sont-elles les plus efficaces ? Contrairement aux formes urbaines, on a ici deux archétypes comme réponse principale à la croissance de population : ils suffisent à équilibrer la demande de logement mais aussi d'emplois, avec un jeu d'« échanges internes » à la métropole ainsi que d'« échanges externes », une portion décroissante d'emplois étant situés à l'extérieur de la métropole. Le rôle du cœur du territoire reste donc important dans la dynamique économique.

I.3.b. En sortie de URBAN-SPATIALIZER

Occupation du sol

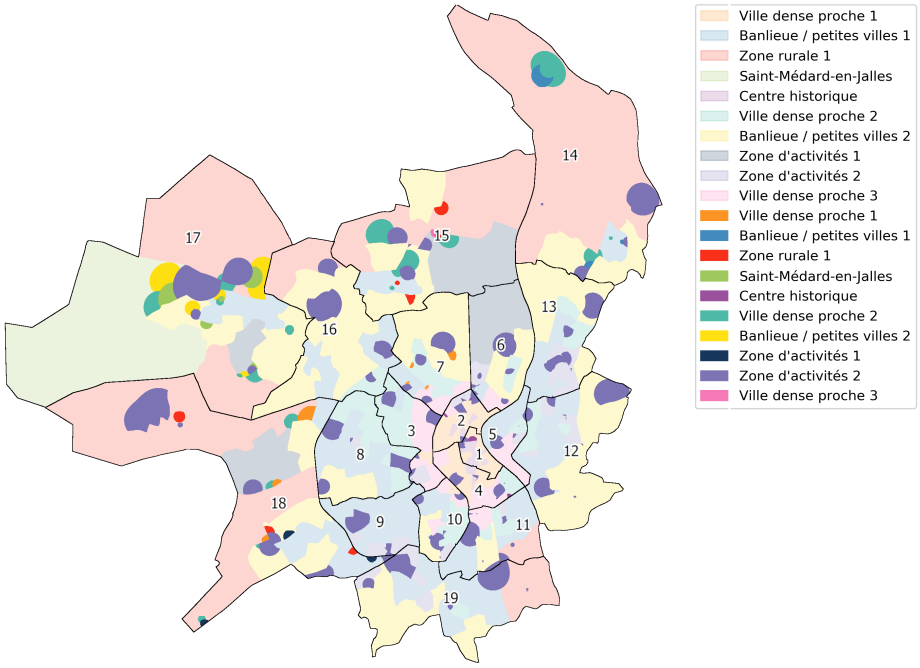
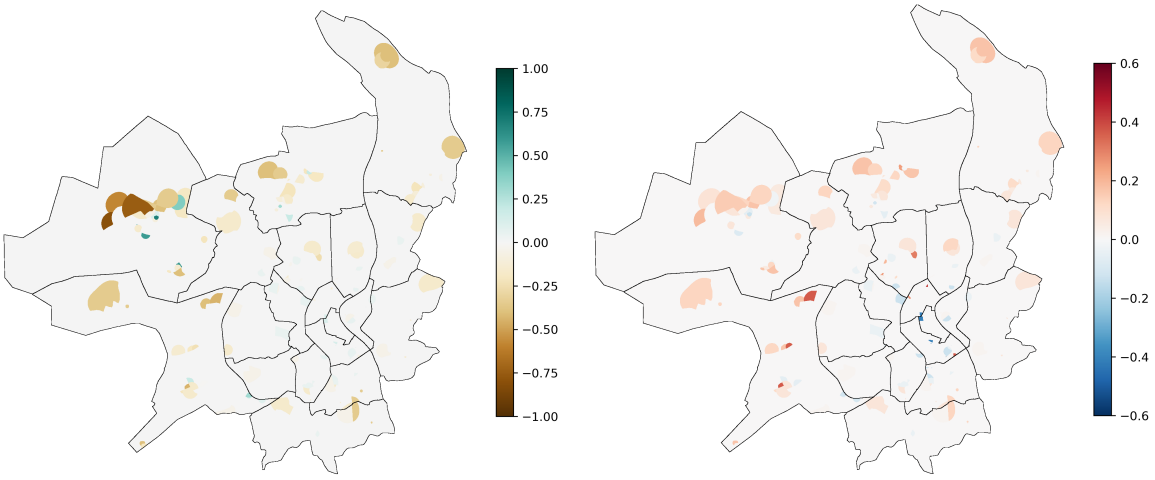


FIGURE 4.12 – Répartition des archétypes de formes urbaines en 2050 dans le scénario Base. Les archétypes pâles en arrière-plan sont les formes existant en 2014.

Les sorties de URBAN-SPATIALIZER dessinent sur la carte 4.12 une répartition générale des modifications dans la métropole avec en particulier l'implantation de l'archétype *Zone d'activités 2* sur l'ensemble du territoire par « petites touches ». On peut remarquer quelques archétypes qui sont dans la continuité des formes urbaines existantes (*Centre historique* dans la zone BDX01 au centre de Bordeaux, *Zone rurale 1* dans les zones BDX15 et BDX18 notamment). Certaines zones et communes voient de grands investissements et la modification d'une part importante de leur territoire : c'est le cas de la zone BDX14 avec Ambès au nord et Saint-Vincent-de-Paul au sud-est, de Blanquefort dans la zone BDX15, de Saint-Aubin-de-Médoc et Saint-Médard-en-Jalles dans la zone BDX17 ou encore de Pessac dans la zone BDX18. Ces villes plus lointaines du cœur de la métropole illustrent le véritable potentiel qu'offrent les villes périurbaines et leur « réserve de foncier ». Ces développements se font globalement à proximité des centres-villes existants, notamment du fait de la proximité des écoles scolaires.

Quand on regarde les conséquences des changements d'occupation des sols, on constate assez logiquement que ces implantations d'archétypes plus artificialisés [8] conduisent à diminuer assez drastiquement la présence d'espaces naturels (voir figure 4.13a), et à augmenter l'emprise au sol des bâtiments (voir figure 4.13b) dans ces zones de la métropole actuellement largement recouvertes de surfaces naturelles. Les seules portions de la métropole qui voient une hausse de la portion de surface recouverte par de la végétation sont celles proches du centre (BDX01–04). Les réductions importantes survenant au nord-ouest du territoire, sur les

8. Seulement 16.3 % de surfaces naturelles pour les *Zones d'activités 2* par exemple.



(A) Aire végétalisée (ratio)

(B) Coefficient d'emprise au sol (ratio)

FIGURE 4.13 – Cartes de différences de deux paramètres caractéristiques des formes urbaines dans le scénario Base en 2050 par rapport à 2014.

communes de *Saint-Médard-en-Jalles* et *Saint-Aubin-de-Médoc*, ont lieu dans des zones globalement très vertes, les terrains en question étant largement recouverts de forêts comme dans les environs jusqu'à l'extérieur de Bordeaux Métropole vers le nord et l'ouest. Les modifications de la zone BDX14 ont lieu quant à elles dans un contexte agricole, avec des problématiques de concurrence foncière potentielle plus importantes : on constate en effet sur la figure 4.12 que les investissements dans cette zone du nord-est de la métropole ont lieu sur des archétypes *Zone rurale 1*.

Bâtiments

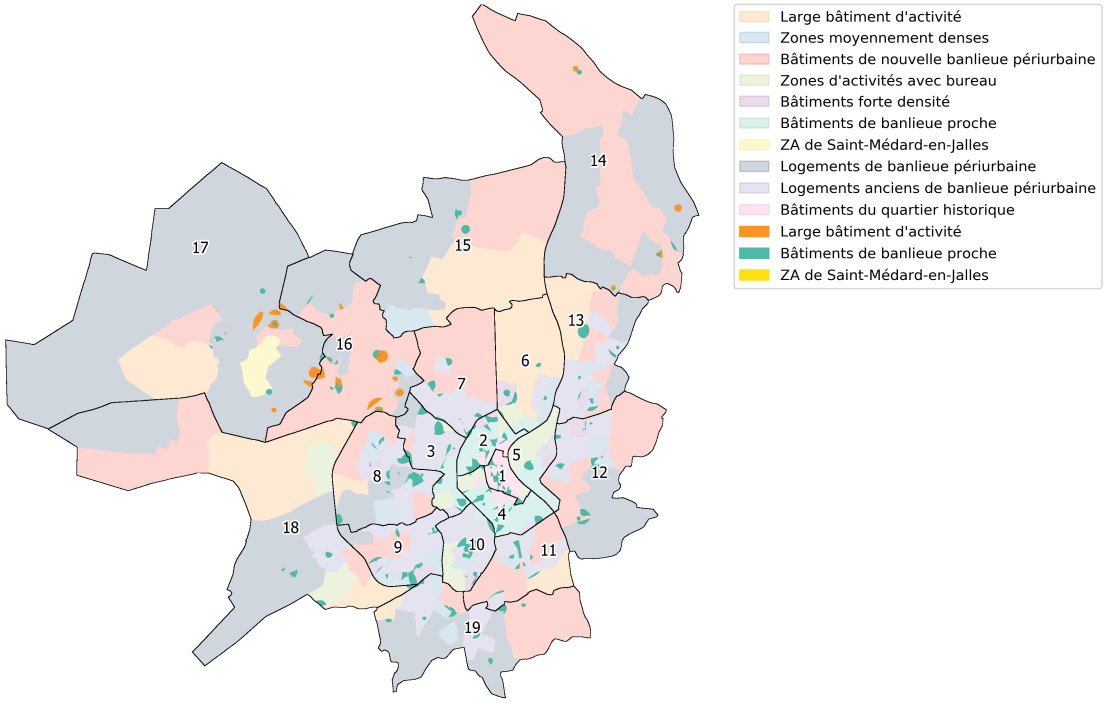


FIGURE 4.14 – Répartition des archétypes de bâtiments en 2050 dans le scénario Base. Les archétypes pâles en arrière-plan sont les formes existant en 2014.

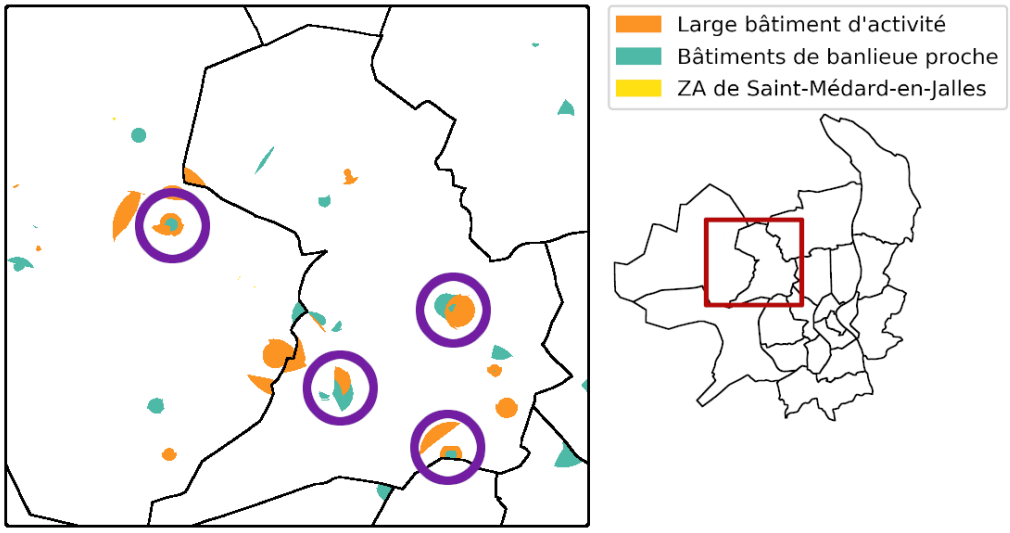


FIGURE 4.15 – Zoom de la carte des différences de répartition en 2050 par rapport à 2014 dans le scénario Base sur une portion de la métropole.

Les modifications associées aux investissements en archétypes de bâtiments proposées par TIMES-URBAN sont bien plus légères mais également largement réparties dans la métropole (voir figure 4.14). On remarque notamment d'importants investissements dans les zones centrales. Quelques zones voient une forme de mixité se développer avec des déploiements de plusieurs archétypes imbriqués les uns dans les autres comme le montre la carte 4.15 : les archétypes *Larges bâtiments d'activités* et *Bâtiments de banlieue proche* sont *a priori* construits les uns à côtés des autres.

Le dernier indicateur que l'on peut étudier sur la répartition géographique des modifications est la hauteur moyenne des bâtiments (voir carte 4.16). De façon très similaire aux modifications de couverture végétale et d'emprise au sol que nous avons pu constater au début de cette sous-section sur les résultats des projections, on peut noter ici une différence importante entre les territoires du centre de la métropole (zones BDX01, BDX02, BDX04 et BDX06), de Pessac (BDX09) et de Talence (BDX10) qui voient les hauteurs de quelques zones diminuer en moyenne de quelques mètres (portions où les bâtiments ont un étage en moins) là où le nombre d'étages des bâtiments modifiés dans le reste de la métropole semble globalement plutôt augmenter d'un ou deux niveaux.

FIGURE 4.16 – Répartition de la modification de hauteur des bâtiments en 2050 dans le scénario Base par rapport à 2014.

I.4. Le récit prospectif de la ville future

Ce scénario de référence dessine donc une métropole qui se reporte largement sur ses *territoires périphériques* et en particulier ruraux pour son développement en 2050. Ainsi, les communes de Saint-Médard-en-Jalles, Martignas-sur-Jalle, Saint-Aubin-de-Médoc à l'ouest, Blanquefort au nord, Ambès et Saint-Vincent-de-Paul au nord-est, Artigues-près-Bordeaux et Carbon-Blanc à l'est, Villenave-d'Ornon et Pessac au sud, voient des investissements importants faits dans leurs limites administratives pour modifier l'organisation urbaine et l'occupation des sols. La ville continue de se construire sous *plusieurs formes variées* disposées sur l'ensemble de la métropole, exception faite de Bassens, Saint-Louis-de-Montferrand et Bouliac qui ne voient que des changements mineurs. Un archétype est choisi et déployé sur toutes les communes, dans des proportions variables, celui de *zones d'activités*, c'est-à-dire de territoire gardant une empreinte végétale assez importante (31 %) mais surtout beaucoup de terrains convertibles.

Les espaces déjà artificialisés sont en effet amplement mis à contribution pour le déploiement des nouveaux bâtiments imposés par l'évolution de la population : on assiste à une vaste conversion de l'occupation de surfaces peu bâties. Les parkings, les centres commerciaux, les friches sont par exemple convertis et occupés par des bâtiments mixtes. La forme privilégiée pour accueillir la population est la plus équitablement répartie entre *logements* et *locaux d'activité* parmi les formes où plus de la moitié de la surface est consacrée aux habitations [a]. Les habitations, avec une hauteur moyenne de l'ordre de trois étages, peuvent ainsi accueillir des ateliers au rez-de-chaussée ou des bureaux au premier étage, des commerçants avec pignon sur rue ou encore des petites entreprises du tertiaire. On peut même imaginer une vie commune entre ces personnes qui se croisent et l'émergence d'échanges culturels entre ceux qui rentrent chez eux et ceux qui quittent leur travail le soir.

Les quartiers du centre de la métropole (Bordeaux, l'est de Mérignac et de Pessac, Talence, Bègles) continuent bien sûr de garder un rôle primordial, notamment en tant que pourvoyeur d'emplois pour les zones plus périphériques qui sont plutôt concentrées sur le logement. L'extérieur de la métropole accueille également, comme maintenant, les lieux d'occupation professionnelle d'une partie des habitants de Bordeaux Métropole.

a. En excluant l'archétype de bâtiments correspondant au *centre historique*, forme difficilement reproductible aujourd'hui et mise à part de l'exercice de modélisation.

II. **Scénario** : population doublée pour Bordeaux en 2050

II.1. Contexte

En étudiant le scénario *50 000 logements* pour Bordeaux, nous pouvons constater l'ambition pour Bordeaux d'être une métropole millionnaire (en habitants) en 2030. Il est possible de prolonger cette tendance jusqu'en 2050 afin d'obtenir une demande en population sur toute la période de notre exercice de modélisation. Ainsi, nous obtenons quatre simulations de l'évolution démographique entre 2014 et 2050 (voir figure 4.17) : le scénario central de l'INSEE, celui où la population double d'ici à 2050 et deux trajectoires inspirées de l'étude 50 000 logements de la métropole (l'une avec une croissance linéaire et l'autre en appliquant la courbe de tendance de l'INSEE à l'objectif du million d'habitants en 2030). On obtient dans le cas linéaire une population d'un peu plus de 1,313 million d'habitants en 2050 tandis que l'application de la dynamique démographique de l'INSEE parvient à 1,230 million d'habitants.

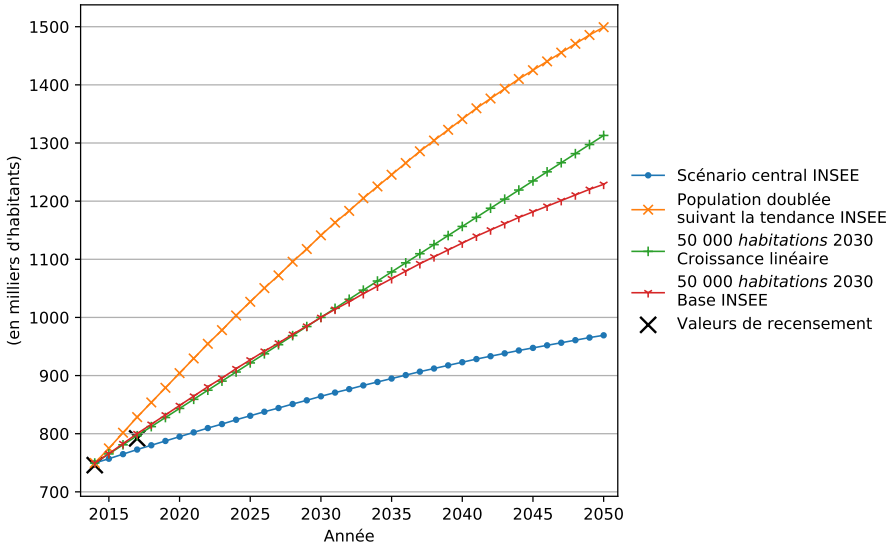


FIGURE 4.17 – Tendances d'évolution de la population : scénario central de l'INSEE, scénario fictif où la population double entre 2014 et 2050 et deux scénarios basés sur le principe derrière l'Appel à Projets Innovations « 50 000 logements ».

Il nous a semblé intéressant, bien que cette première estimation soit déjà ambitieuse, d'aller plus loin pour étudier un cas appliquant une pression encore plus forte sur le foncier et d'imaginer une situation où la population double entre 2014 et 2050. C'est le scénario retenu pour cette partie, et qui compare donc la trajectoire de population du scénario `Base` avec le doublement de population. De la sorte, nous exagérons l'exercice des 50 000 logements pour voir la trajectoire de TIMES-URBAN face à une tension plus grande, et ce que les résultats préconisent comme changements nécessaires pour répondre à la demande finale.

II.2. Objectifs

Ce premier scénario a donc un double objectif :

1. tester la *réaction* de TIMES-URBAN face à des demandes finales différentes afin de vérifier à la fois son bon fonctionnement et la plausibilité de ses résultats ;
2. **évaluer la capacité de la métropole bordelaise à accueillir une croissance démographique considérable** et en **étudier les conséquences sur le territoire**. Une telle croissance peut par exemple être liée à plusieurs situations envisageables pour le futur de Bordeaux : (*i*) une densification encore plus grande des habitants dans les grandes métropoles, par une hausse de la sédentarisation des habitants (par exemple dans une société « tout numérique » [LE GALLIC (2017b)]) ; (*ii*) l'accueil de réfugiés climatiques (venant de l'étranger ou tout simplement des côtes françaises ou européennes) [DECROP (2008) et LEGOUX (2010)].

II.3. Contraintes et développements spécifiques

	Cas	**2014**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**	**2035**	**2040**	**2045**	**2050**
Facteur d'évolution	Référence	1,00000	1,00986	1,06045	1,10841	1,15309	1,19382	1,23127	1,26413	1,29304
Bordeaux Métropole (en *milliers*)	Référence	750	757	795	831	864	895	923	948	969
Facteur d'évolution	Doublement	1,00000	1,03363	1,20628	1,36996	1,52242	1,66143	1,78924	1,90135	2,00000
Bordeaux Métropole (en *milliers*)	Doublement	750	775	904	1 027	1 141	1 245	1 341	1 425	1 499

TABLEAU 4.4 – Tableau de l'évolution de la population dans le scénario de référence et dans notre scénario DP de doublement de la population.

La seule contrainte spécifique appliquée à TIMES-URBAN dans le scénario de doublement de la population concerne la demande finale exogène appliquée au modèle. Le tableau 4.4 en présente les différents paramètres par rapport au scénario de référence.

II.4. Résultats du scénario

Ce scénario de doublement de la population est désigné par le sigle DP par la suite.

II.4.a. En sortie de TIMES-URBAN

Occupation des sols

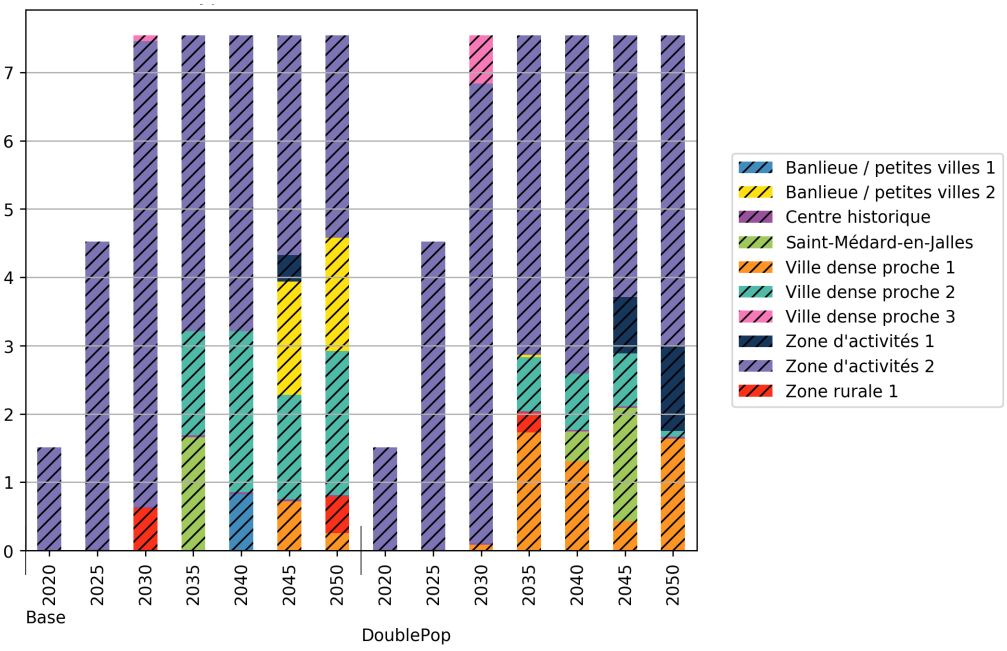
Tout d'abord, on peut remarquer sur le graphique 4.18a que les changements dans le scénario DP par rapport à la trajectoire de référence ne commencent qu'en 2030. TIMES-URBAN sous les contraintes du scénario DP n'utilise que très peu les archétypes *Banlieues / petites villes 1* et 2 et leur préfère *Ville dense proche 1* et 3, ainsi que *Zone d'activités 1*. L'archétype *Ville dense proche 2* n'est déployé que sur 80 hectares environ tous les cinq ans entre 2035 et 2045 inclus là où il était déployé sur presque 2 km² en moyenne entre 2035 et 2050 dans le scénario Base [9]. Enfin, il y a moins d'investissements dans la forme *Zone rurale 1*, qui n'apparaît que pour environ 28 hectares en 2035, là où 62 puis 54 hectares étaient implantés dans la métropole en 2030 et 2050 respectivement dans le scénario de référence. En 2050, d'après la figure 4.18b, ce sont donc les formes *Ville dense proche 1* et *Zones d'activités 1* et 2 qui ont été principalement préférées aux formes *Ville dense proche 2* et *Banlieue / petites villes 2* du scénario Base. On constate également que l'archétype *Saint-Médard-en-Jalles* a été utilisé *à peu près* dans des proportions similaires mais avec un décalage temporel, 2035 pour Base et 2040–2045 pour DP. Enfin, cet ensemble de modifications concerne 10 km² en 2050, 10 km² qui ne sont pas employés dans le scénario DP comme ils l'ont été dans le scénario Base.

La répartition géographique de ces modifications est visible sur les figures 4.19a et 4.19b. Les larges zones extérieures de l'ouest et du nord de la métropole sont les plus impactées par ces changements d'archétypes. C'est également le cas pour deux des zones de la ville de Bordeaux (BDX01 et BDX02) qui, en relatif, voient quelques pourcents de leur territoire évoluer dans le scénario DP par rapport à la trajectoire du scénario Base.

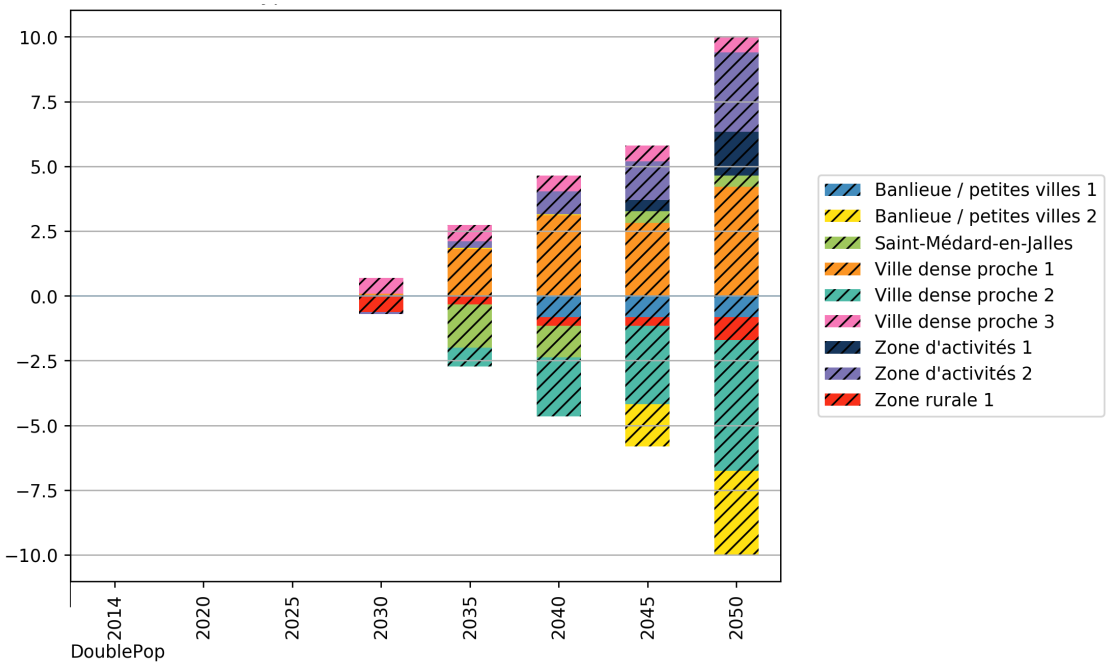
Si l'on étudie la production de terrain bâtissable, TIMES-URBAN utilise les territoires *autres*, comme en témoigne le graphique 4.20, pour faire face à l'augmentation de la demande de logements dans le scénario DP. Les modifications de production de terrain *bâti* impliquée par les changements de archétypes sont finalement assez minimes : ils représentent 4.686 km² de production de terrain bâti (contre 1.393 km² dans le scénario Base, ce qui correspond à une augmentation nette de 3.293 km² en 2050) auxquels on ajoute 0.255 km² d'imports fictifs et 16.617 km² de conversion. Cela fait donc une production de 20.165 km² de terrain bâti en plus en 2050 dans le scénario de doublement de la population par rapport au scénario de référence.

Un élément important est en effet à noter dans ce scénario DP : l'utilisation par TIMES-URBAN d'imports fictifs pour combler un manque de surfaces *bâtissables*. Ce mécanisme, interne au framework TIMES, traduit une situation d'infaisabilité :

9. 1,53 km² en 2035, 2,36 km² en 2040, 1,53 km² en 2045, et 2.11 km² en 2050 pour être exact.

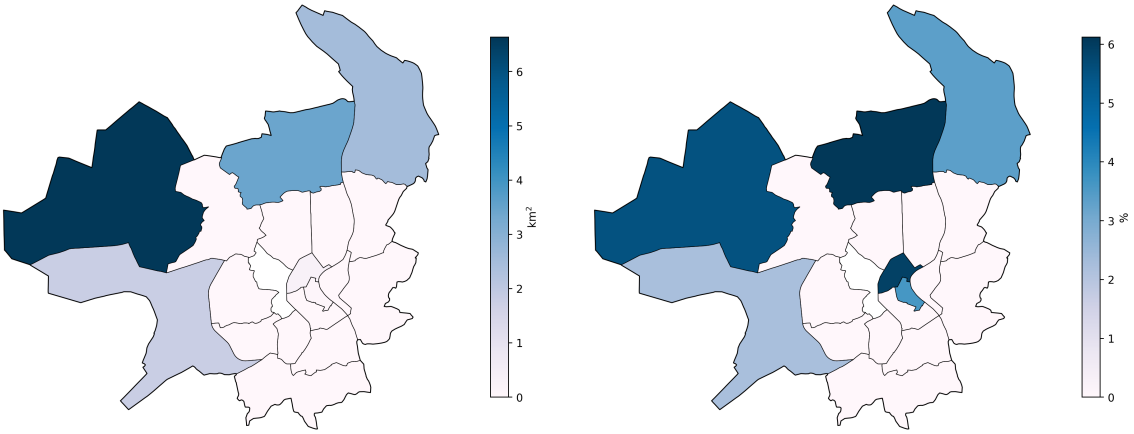


(A) Nouveaux investissements (*non relatif au cas* `Base`)



(B) Superficie utilisée (*relative au cas* `Base`)

FIGURE 4.18 – Différences dans l'évolution de l'utilisation des sols dans le scénario DP en km² chaque année.



(A) Changements absolus (B) Changements relatifs

FIGURE 4.19 – Changements absolus (*gauche*) et relatifs (*droite*) d'occupation des sols en cumulé dans le scénario DP par rapport au scénario de référence `Base`.

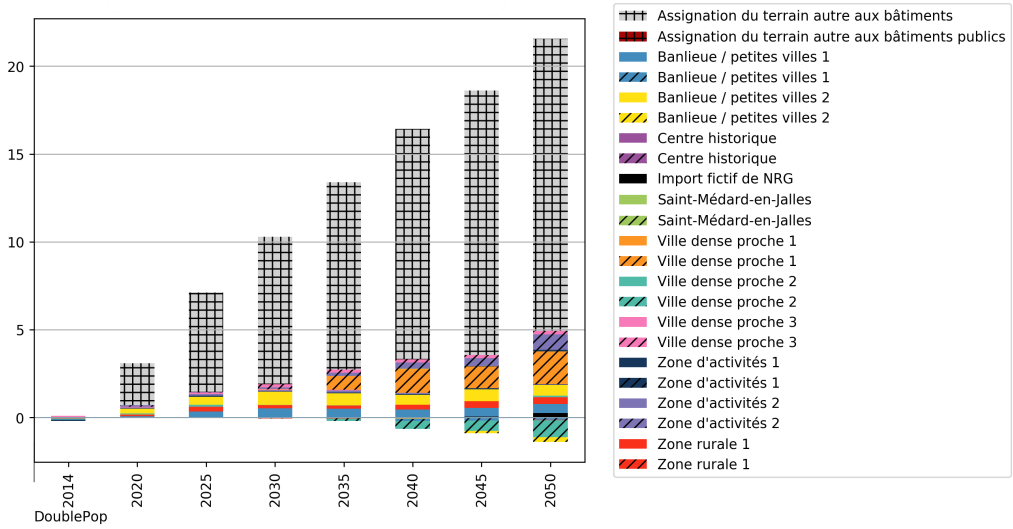


FIGURE 4.20 – Production de terrain bâtissable selon les archétypes.

Process	Ville dense proche 1	Banlieue / petites villes 1	Zone rurale 1	Saint-Médard-en-Jalles	Centre historique	Ville dense proche 2	Banlieue / petites villes 2	Zone d'activités 1	Zone d'activités 2	Ville dense proche 3	Assignation du terrain autre aux bâtiments	Import fictif de NRG
BDX01	0,027	-	-	-	-0,001	0,009	-	-	-0,021	-	0,297	0,106
BDX02	0,081	-	-	-	-0,0003	0,026	-	-	-0,058	-	1,075	0,149
BDX03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,631	-
BDX04	-	-	-	-	-0,0002	-	-	-	0,006	-	1,659	-
BDX05	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,005	-	0,396	-
BDX06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,695	-
BDX07	0,010	-	-	-	-	-	-	-	0,008	-	1,163	-
BDX08	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001	-	1,830	-
BDX09	-	-	-	-	-	-	-	-	0,012	-	1,145	-
BDX10	-	-	-	-	-	-	-	-	0,008	-	1,221	-
BDX11	-	-	-	-	-	-	-	-	0,013	-	0,963	-
BDX12	-	-	-	-	-	-	-	-	0,043	-	1,021	-
BDX13	-	-	-	-	-	-	-	-	0,030	-	0,875	-
BDX14	0,156	-0,126	-	-	-	-0,166	0,004	0,065	0,039	-	-	-
BDX15	**0.302**	**-**	**-0.009**	**-**	**-**	**-0.538**	**-**	**-**	**0.363**	**0.200**	**-**	**-**
BDX16	-	-	-	-	-	-	-	-	0,002	-	1,539	-
BDX17	1,252	-	-	0,002	-	-0,318	-0,286	-	0,391	-	-	-
BDX18	0,041	-	-0,015	-	-	0,034	-	0,029	0,087	-	-	-
BDX19	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,033	-	1,105	-

TABLEAU 4.5 – Répartition des productions de terrain *bâti* en km² des nouveaux investissements en archétypes et autres procédés employées dans le scénario DP par rapport au scénario Base en 2050. On a indiqué en bleu les productions supplémentaires par rapport au scénario de référence et en rouge les productions supérieures dans le scénario Base.

pour y pallier, il est fait recours à des importations, à très fort coût, de ressources fictives [10]. En ce qui concerne la distribution géographique de ces productions supplémentaires de terrain bâti (voir tableau 4.5), dans notre scénario DP, il est fait recourt à l'importation fictive de terrain *bâti* au sein des zones BDX01 en 2045 à hauteur de 5.36 hectares, en 2050 pour 10.61 hectares et BDX02 en 2050 pour 14,88 hectares.

On observe également que les *Zones d'activités 2* et les phénomènes de *conversion* ont lieu à travers l'ensemble de la métropole à l'exception des zones centrales (BDX01, BDX02, BDX03, BDX05 et BDX06) pour l'archétype – qui voit même un non investissement dans le scénario DP dans ces zones par rapport au scénario Base – et des zones périphériques (BDX14, BDX15, BDX17 et BDX18) pour le changement d'occupation. La *Ville dense proche 1* est déployée sur l'ensemble du territoire. Si l'on regarde plus spécifiquement la zone BDX15 par exemple (dont la ligne est mise en **gras** dans le tableau 4.5), on peut constater que la *Ville dense proche 2* a été remplacée dans le scénario DP par un mix des archétypes *Villes denses proches 1* et 2, et *Zone d'activités 2*.

Globalement, la métropole perd très légèrement en superficie de sol non artifi-

10. On imagine par exemple que ces ressources proviennent de l'extérieur du système modélisé, en particulier quand celui-ci est un pays comme dans bien des modèles TIMES énergétiques classiques : les imports fictifs peuvent alors représenter une forme de prospection supplémentaire que ferait le pays étudié pour obtenir d'un autre État non inclus dans l'exercice de modélisation les commodités en question. Ainsi, s'il manque du pétrole à la France, celle-ci pourrait se tourner vers le Canada ou les États-Unis même si cela représente des coûts bien plus importants ou une impossibilité politique *a priori*. Il est donc en général possible de trouver une interprétation à ces imports fictifs. Dans notre cas, on peut y voir des changements supplémentaires ou exceptionnels, à partir de foncier maîtrisé par la métropole ou le changement d'emplacement de grandes entreprises. Si l'on considère que ces imports fictifs sont associés à un coût important, ils présupposent donc un investissement majeur, par exemple de la part de la métropole ou de l'État (via une Opération d'Intérêt National ou OIN, voir section IV.1.d du chapitre 1, p. 55, pour plus d'informations). Ils peuvent également traduire un changement dans les usages : lorsque l'on importe par exemple des *kms-passagers*, c'est-à-dire une demande finale, cela signifie que la demande imposée à TIMES devrait être réduite.

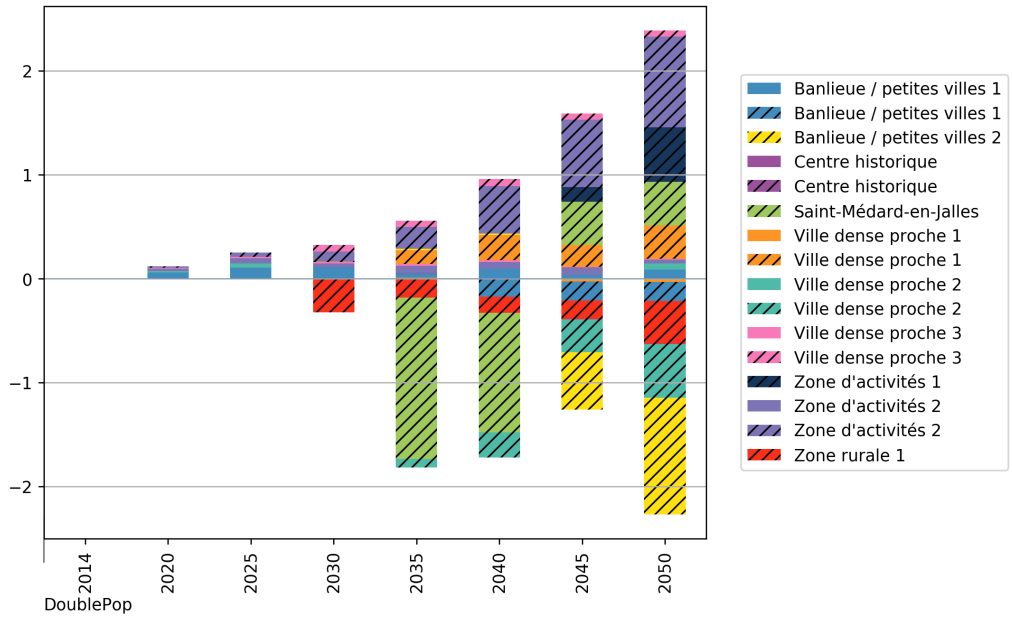


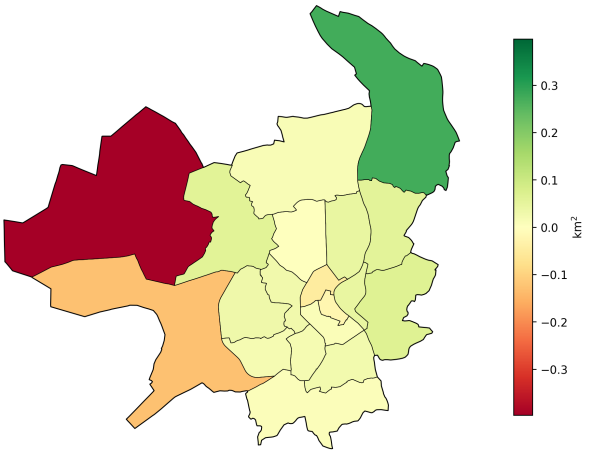
FIGURE 4.21 – Production d'espaces naturels, différences par rapport au scénario Base.

cialisé dans le scénario DP sur l'ensemble de la période considérée. Cette perte est notamment liée à l'abandon partiel des archétypes *Saint-Médard-en-Jalles*, *Zone rurale 1* et *Banlieue / petites villes 2*, les archétypes les remplaçant (*Zones d'activités 1* et *2*, *Ville dense pproche 1*…) ne produisant que peu d'espaces naturels par km². Plus précisément, 0.115 km² sont en moins en 2050 par rapport au scénario Base.

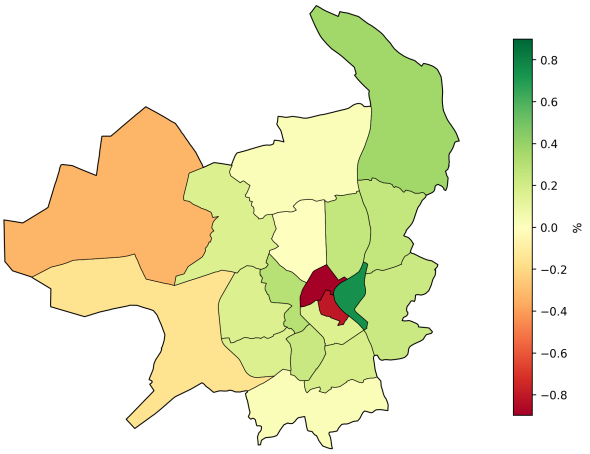
Quand on regarde la distribution géographique de ces changements de végétation entre les scénarios DP et Base (voir figures 4.22a et 4.22b), l'ensemble des zones de la métropole ont légèrement plus de végétation dans ce scénario de doublement de la population sauf les deux parties occidentales (BDX17 et BDX18) ainsi que dans le cœur de Bordeaux (BDX01 et BDX02). En ce qui concerne l'évolution depuis 2014 (voir figures 4.22c et 4.22d), le scénario DP diminue les empreintes naturelles dans les zones périphériques de l'ouest et du nord de la métropole ainsi que dans les deux mêmes zones du centre (BDX01 et BDX02). Que ce soit par rapport à 2014 ou par rapport au scénario de référence, les territoires périurbains de la couronne (BDX06–13) ainsi que deux zones de la ville de Bordeaux (BDX04 et BDX05) voient une augmentation de leurs espaces naturels. Il faut toutefois nuancer les constats faits ici en remarquant qu'il s'agit à chaque fois de surfaces très faibles, représentant moins d'un pourcent des superficies des zones concernées.

Bâtiments

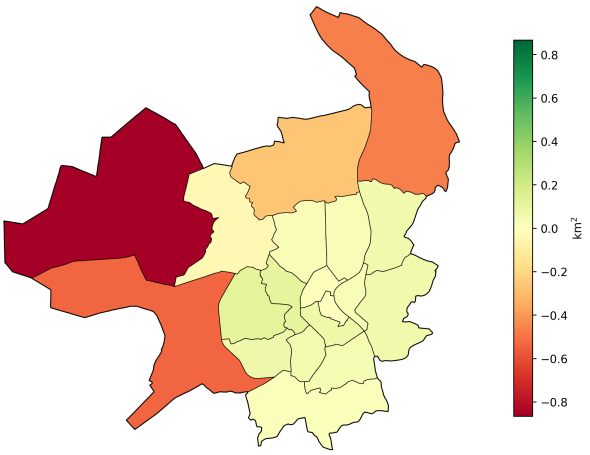
Doubler la population en 35 ans n'est pas quelque chose d'anodin et impose un effort important de construction. La figure 4.23 illustre le nombre de km² qu'il faudrait bâtir d'ici 2050. Il s'agit ici d'une valeur colossale, dont 19.824 km² de *Bâtiments de banlieue proche* qui contribuent aux 22.402 km², soit 2240 hectares, à bâtir. Si, de la même façon que nous avons utilisé une simple règle de trois dans l'introduction pour calculer le nombre de logements que cela représente, nous prenons 61 m² comme taille moyenne d'un logement, les 19.824 km² de surface bâtie de *Bâtiments de banlieue proche* équivalant à 14.948 km² de logements au sol,



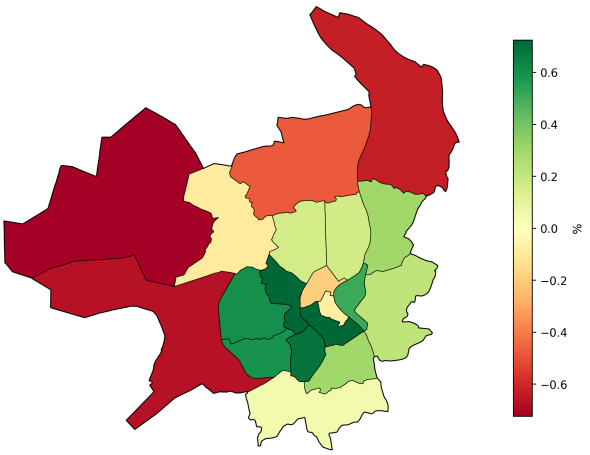
(A) DP par rapport à Base - En absolu



(B) DP par rapport à Base - En relatif



(C) 2050 par rapport à 2014 - En absolu



(D) 2050 par rapport à 2014 - En relatif

FIGURE 4.22 – Évolution de la surface d'espaces naturels en 2050 pour l'ensemble des 19 zones dans le scénario DP par rapport à Base (*haut*) et par rapport à l'année de référence 2014 (*bas*), en absolu (*gauche*) ou en relatif (*droite*).

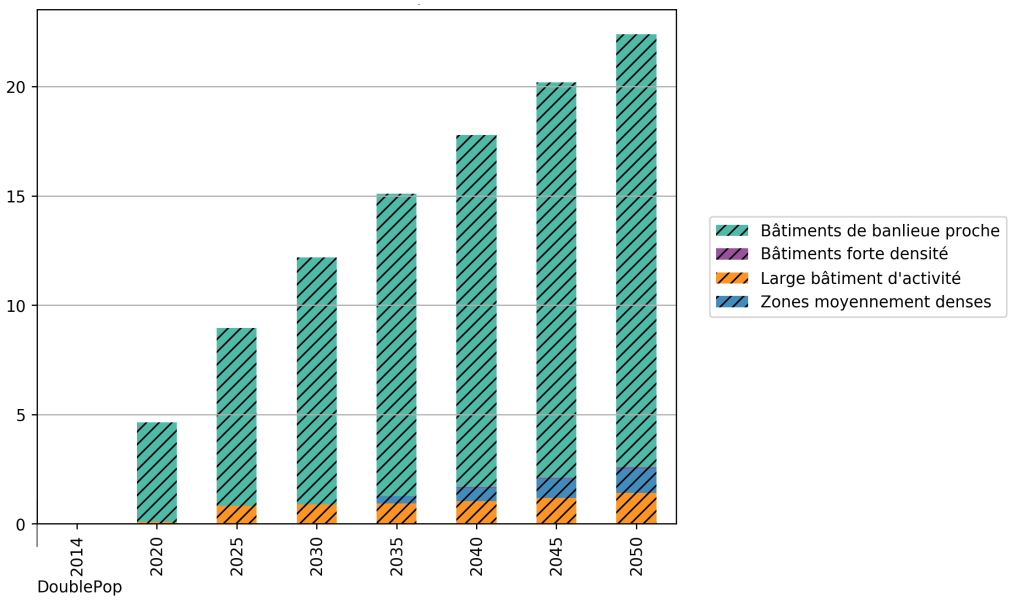
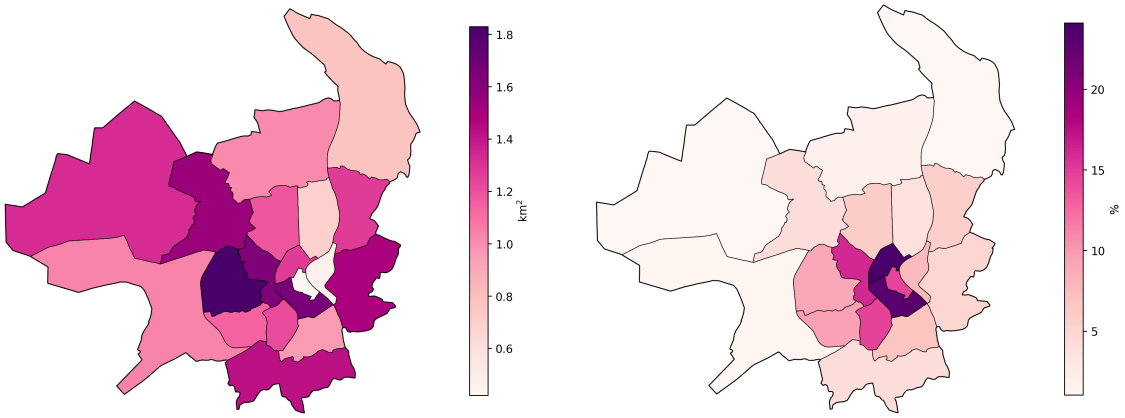


FIGURE 4.23 – Surface recouverte par les bâtiments dans le scénario DP, en différence par rapport au scénario Base. Il n'y a donc que de nouveaux investissements dans le scénario DP : tous les investissements réalisés par TIMES-URBAN sous les contraintes de Base sont également faits dans le scénario DP.

soit, avec 3 étages moyens, à environ 217 000 logements supplémentaires par rapport aux 133 000 du scénario de référence d'ici à 2050, soit 350 000 en tout sur la période ou encore 116 000 tous les quinze ans.

La somme de ces deux valeurs est particulièrement élevée, même pour une métropole aussi dynamique que celle de Bordeaux mais elle est complètement inhérente à la conception de ce scénario. En effet, si au lieu de considérer la croissance de terrain bâti on s'intéresse à l'augmentation de population que cela représente, notre scénario DP voit une croissance de 750 000 personnes entre 2015 et 2050. En considérant qu'un foyer français contient en moyenne 2.2 personnes, cela signifie une augmentation de 340 000 logements entre 2015 et 2050, valeur finalement assez proche de l'estimation fournie par TIMES-URBAN.



(A) Valeur absolue (B) Valeur relative à la superficie

FIGURE 4.24 – Répartition géographique des changements dans le scénario DP par rapport au scénario Base en 2050, en absolu (*gauche*) et relativement à la surface des zones (*droite*).

La distribution géographique de telles modifications, visible sur la figure 4.24a, montre une utilisation plutôt largement répandue dans la métropole des investissements supplémentaires d'archétypes de bâtiments, avec une valeur moyenne de 0.974 km² (0.481) de nouveaux bâtiments par zone (sans prendre en compte les retraits ou changements). L'évolution relative à la superficie des zones (voir carte 4.24b) montre des modifications importantes pour les territoires centraux denses de la métropole (zones `BDX01–04` et `BDX10`), avec des valeurs élevées, jusqu'à 20 % supplémentaires, par rapport au scénario de référence. Ces modifications sont largement liées à la densité de population actuelle, les figures 4.24 étant très proches des cartes de densité de la métropole.

Premières conclusions

Cette première section sur les sorties de TIMES-URBAN a souligné plusieurs points :

- peu de changements sur les archétypes de formes urbaines, l'archétype *Zone d'activités 2* restant largement employé et est complété par plusieurs autres archétypes ;
- la forme *Zone rurale 1* est tout de même quasiment abandonnée ;
- ce sont surtout les zones périphériques de l'ouest et du nord qui voient ces changements mais aussi deux zones centrales de la ville de Bordeaux ;
- la conversion des surfaces *autres* explose avec 16,617 km² en plus en 2050 ;
- TIMES-URBAN est obligé de faire des imports fictifs de terrain ;
- la surface naturelle ne change pas ;
- la principale modification est liée au besoin de construire 217 000 logements supplémentaires sur la période par rapport au scénario `Base`, surtout dans les zones centrales.

II.4.b. En sortie de URBAN-SPATIALIZER

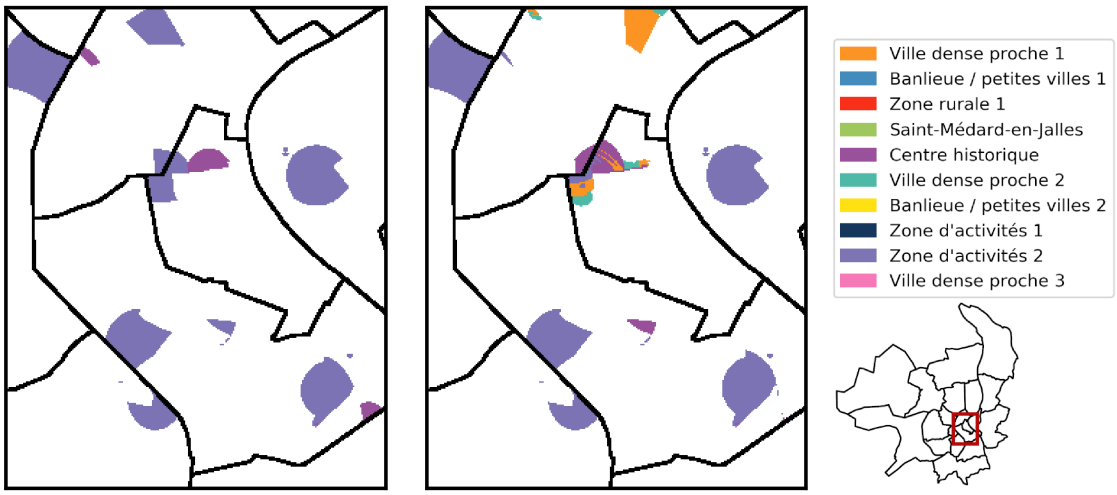
Un premier zoom effectué sur le territoire de la métropole et visible sur la figure 4.25 donne à voir un centre-ville de Bordeaux légèrement modifié dans le scénario DP par rapport à la trajectoire de référence : l'implantation des formes *Villes denses proches 1* et *2* sur deux portions du nord de la zone BDX01 (cf. figure 4.25b) remplace les investissements dans l'archétype *Zone d'activités 2* du scénario Base (cf. figure 4.25a). Ce changement reste cohérent avec le profil du quartier en 2014 (majoritairement recouvert par les archétypes *Centre historique* et *Ville dense proche 1*), il s'agit en fait d'une prolongation des formes existantes, comme dans le scénario Base. Les conséquences sur l'emprise au sol et sur la proportion d'espaces naturels sont donc minimes dans la zone BDX01 comme en témoignent les figures 4.25d et 4.25f, la hausse légère d'espaces naturels visible dans le scénario de base étant diminuée sur la moitié de la superficie concernée.

Une autre zone intéressante à étudier pour les conséquences des contraintes du scénario DP est affichée sur les cartes 4.26. On y voit notamment l'abandon des archétypes *Banlieue / petites villes 2* et *Ville dense proche 2* au profit du seul archétype *Ville dense proche 1*. Les *Zones d'activités 2* prennent également une place plus importante tandis que la forme *Saint-Médard-en-Jalles* reste sensiblement aussi répandue, cette dernière étant toutefois moins concentrée dans les périphéries des surfaces modifiées mais plutôt au cœur de celles-ci. C'est quand on regarde les conséquences sur l'emprise au sol des bâtiments que l'on constate les modifications importantes du scénario DP, comme le montre la figure 4.26d par rapport à celle du scénario de référence 4.26c : deux portions aux extrémités de la zone concernée voient ainsi une emprise au sol passer de moins de 15 % à plus de 50 % entre 2014 et 2050 dans le scénario de doublement de la population. Cet effet est visible également sur les portions d'espaces naturels (voir figures 4.26e et 4.26f) avec une baisse importante de la superficie non artificialisée, notamment à l'est contrairement au scénario Base.

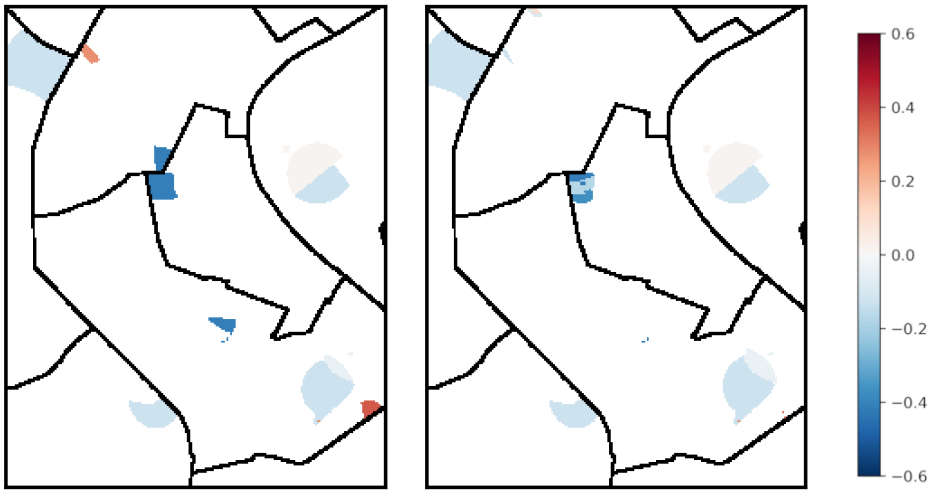
Bâtiments

Quand on étudie la carte des nouvelles constructions de bâtiments entre 2014 et 2050 dans le scénario DP, on remarque tout d'abord un déploiement considérable de bâtiments sur l'ensemble du territoire et en particulier dans les zones de la première couronne autour du centre de la métropole. La figure 4.27 illustre ce phénomène en proposant une vue rapprochée de l'ouest de Bordeaux et de l'est de Mérignac. Des *Bâtiments de banlieue proche* y sont construits dans le scénario Base comme dans celui DP mais la surface concernée est bien plus vaste dans le second cas. Des bâtiments de *Zones moyennement denses* ont également été ajoutés à l'est de l'aire présentée (voir figures 4.27a et 4.27b). Les conséquences sur la hauteur moyenne des bâtiments est donc assez immédiate, avec une hausse globale des niveaux moyens des bâtiments, à l'exception de certaines portions des zones BDX02 et BDX04. Ces parties de la métropole abritent en 2014 des constructions globalement hautes, avec des valeurs moyennes autour de 7,5 mètres, et on y constate une baisse légère de la hauteur des bâtiments (parfois de plusieurs étages) dans le scénario DP.

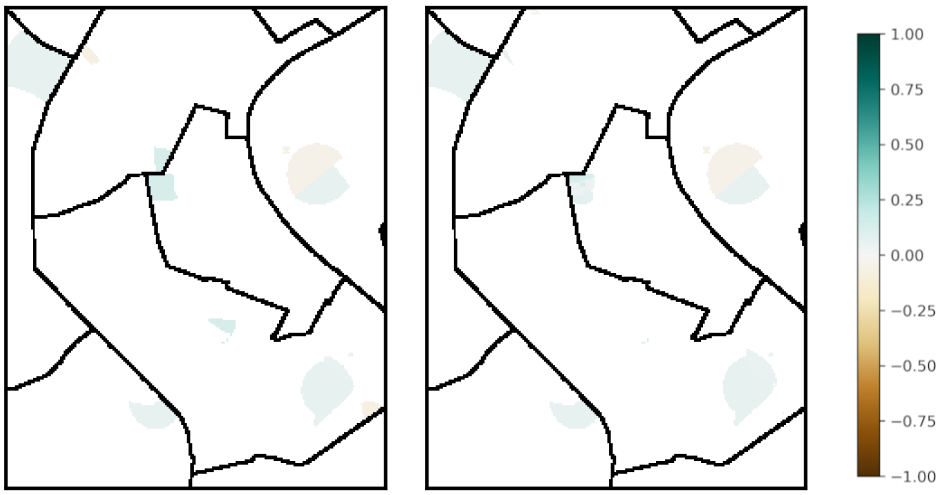
La deuxième portion du territoire qu'il peut être intéressant d'étudier ici se situe



(A) Scénario Base (B) Scénario DP

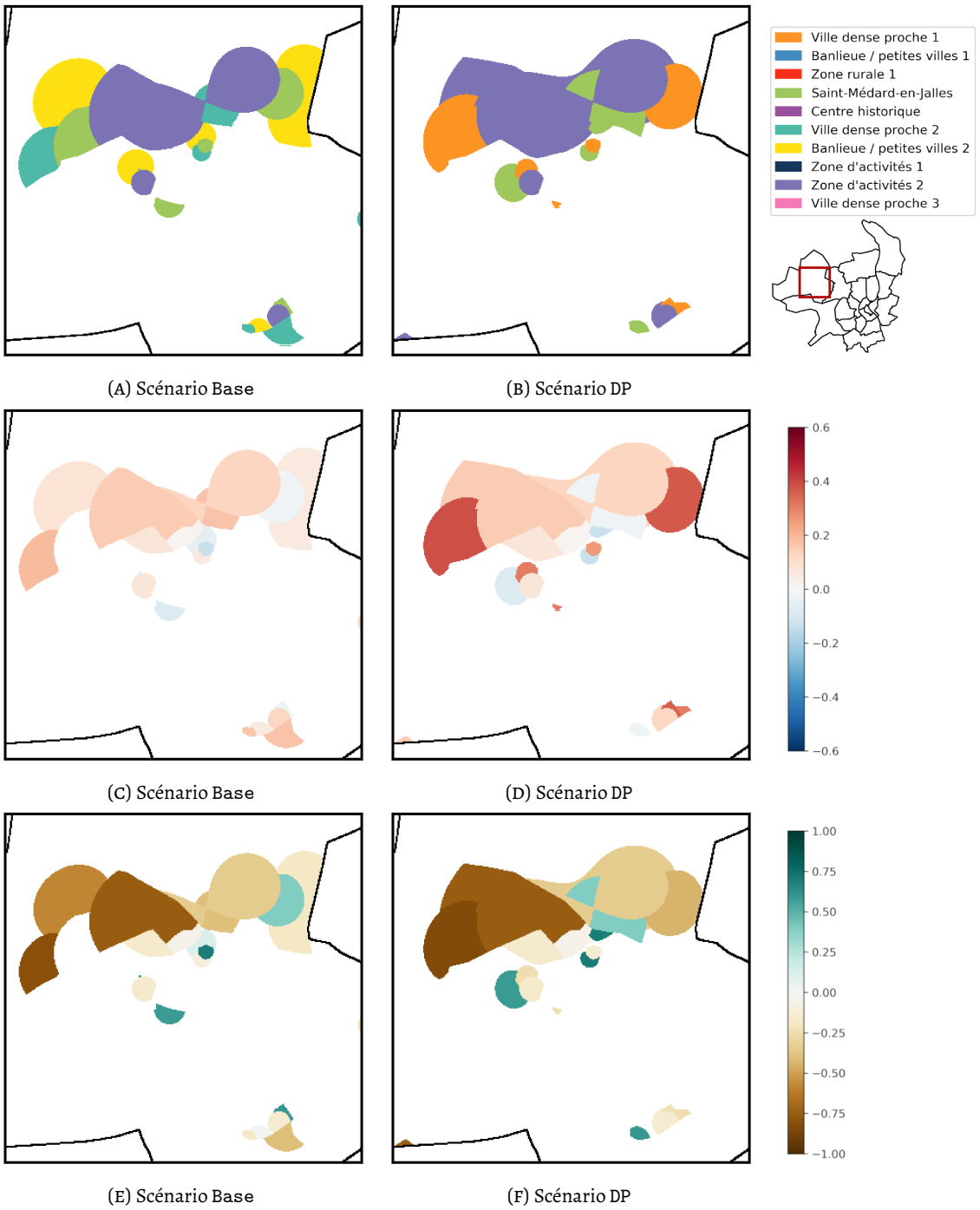


(C) Scénario Base (D) Scénario DP



(E) Scénario Base (F) Scénario DP

FIGURE 4.25 – Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *formes urbaines* (*haut*), le coefficient d'emprise au sol (*millieu*) et la proportion d'espaces naturels (*bas*) sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans le scénario de référence (*gauche*) et dans le scénario DP (*droite*). Les parties blanches de ces images correspondent à des portions du territoire non modifiées par le scénario DP par rapport au scénario Base.

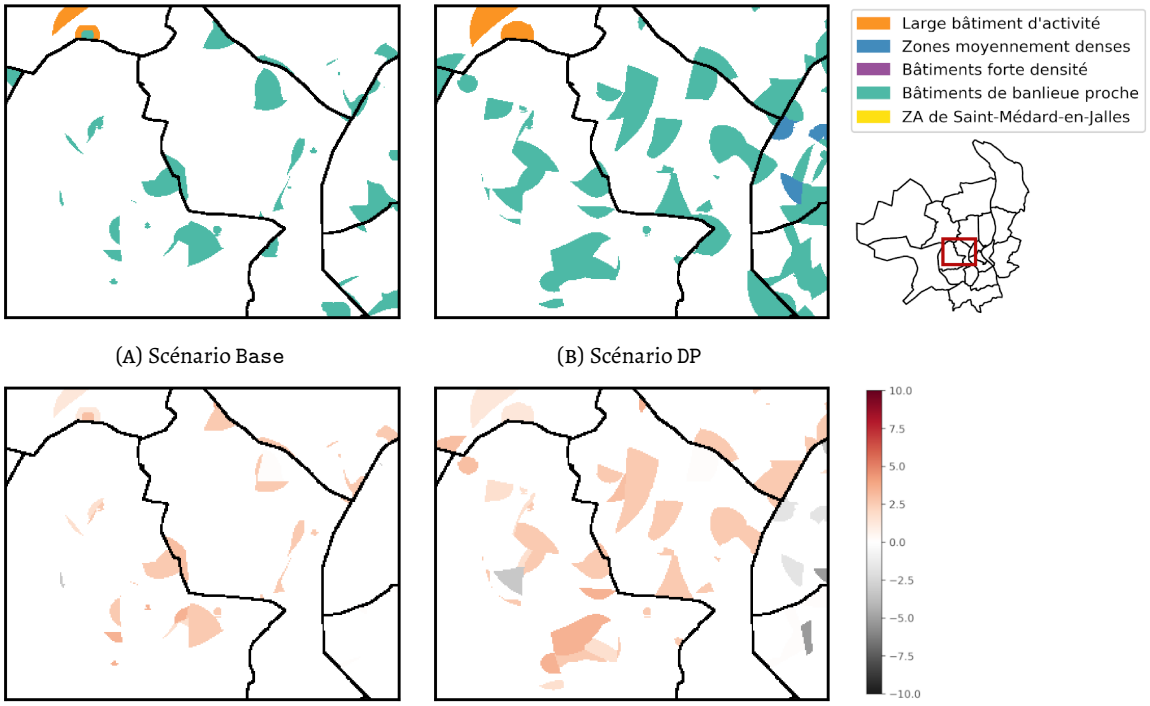


(A) Scénario Base (B) Scénario DP

(C) Scénario Base (D) Scénario DP

(E) Scénario Base (F) Scénario DP

FIGURE 4.26 – Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *formes urbaines* (*haut*), le coefficient d'emprise au sol (*millieu*) et la proportion d'espaces naturels (*bas*) sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans le scénario de référence (*gauche*) et dans le scénario DP (*droite*).

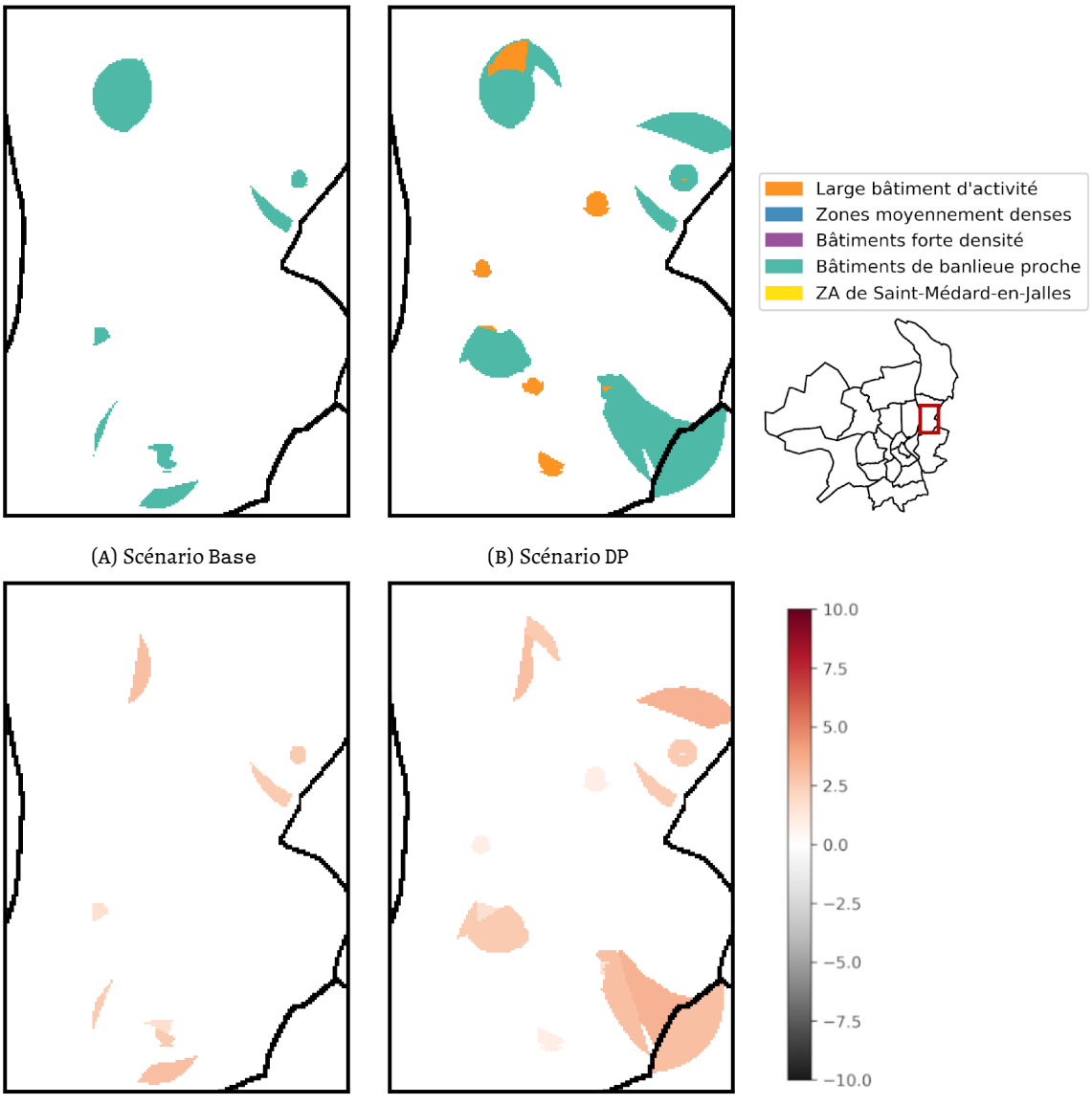


(A) Scénario Base (B) Scénario DP

(C) Scénario Base (D) Scénario DP

FIGURE 4.27 – Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *bâtiments* (*haut*) et la hauteur moyenne (*bas*) sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans le scénario de référence (*gauche*) et dans le scénario DP (*droite*).

à l'est du territoire (voir figure 4.28) : on y voit également une haute augmentation des constructions entre 2014 et 2050, qui correspondent à une hausse d'un étage environ (2.5 mètres) de la plupart des bâtiments dans les zones étudiées. Une autre différence importante de la trajectoire proposée par TIMES-URBAN dans le scénario DP par rapport au scénario de référence est la construction de *Larges bâtiments d'activité* à plusieurs endroits distincts sur de petites surfaces. Il peut s'agir d'un seul bloc de bâtiments par exemple ou d'un projet immobilier d'un promoteur correspondant à une transformation spécifique (nouveau siège social d'une entreprise, nouveaux locaux partagés, etc.).



(A) Scénario Base (B) Scénario DP

(C) Scénario Base (D) Scénario DP

FIGURE 4.28 – Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *bâtiments* (*haut*) et la hauteur moyenne (*bas*) sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans le scénario de référence (*gauche*) et dans le scénario DP (*droite*).

II.5. Le récit prospectif de la ville future

Suite aux conséquences désastreuses du changement climatique, la France a accepté d'accueillir de nombreux réfugiés climatiques de pays insulaires menacés par la montée des eaux. La ville de Bordeaux s'est bien sûr proposée pour loger et abriter ces personnes, forte de son vaste territoire et de sa dynamique immobilière. Ce phénomène conjugué à la croissance démographique habituelle de la métropole ont conduit à ce que la population double entre 2014 et 2050.

Face à cette augmentation importante de la demande en logement, la ville a revu radicalement son plan d'urbanisme et le découpage de son occupation des sols : le renforcement des liens locaux et la mise en place de liaisons régulières avec les intercommunalités voisines ont renforcé l'autonomie du département de la Gironde. En combinant ce placement politique avec le développement de solutions de bus hydrogènes et électriques, l'augmentation de la pratique du vélo ainsi qu'avec la marche à pied, l'empreinte des routes a pu être drastiquement diminuée. De plus, l'abandon du principe des centres commerciaux et le développement des marchés locaux ont libéré des larges surfaces de sol contruisible.

Ces terrains ont permis de construire plus de 350 000 logements sur la période 2014 - 2050, parfois au détriment de la qualité de ces derniers. Ceux-ci sont pour la plupart des bâtiments mixtes logements et locaux d'activité mais quelques zones ont vu des barres d'immeubles être construites dans la précipitation. Le cœur de Bordeaux, protégé par le classement au patrimoine mondial de l'UNESCO, n'a que très peu été modifié. Dans le reste du territoire, ce sont de vastes projets immobiliers sur plusieurs dizaines d'hectares qui ont vu le jour, les travaux de construction rythmant la vie des bordelais sur la période. Face à cette augmentation importante de la main d'œuvre étrangère parfois très qualifiée, de nombreuses entreprises ont choisi de construire de nouveaux locaux voire d'implanter leurs sièges sociaux autour des centres-villes des périphéries, baissant légèrement la balance des trajets pendulaires qui continue de drainer la population des périphéries vers les emplois centraux.

La métropole a réussi à conserver tant bien que mal ses espaces naturels et a tenté sans grand succès de les réintroduire dans les parties plus denses du centre. Mais la pression sur le logement a été trop forte et la plupart des zones de Bordeaux Métropole restent trop peu vertes, renforçant les risques naturels. Les forêts des périphéries ont été légèrement grignotées par l'avancée de l'urbanisation.

III. **Scénario** : zéro artificialisation nette

III.1. Contexte

L'artificialisation peut être définie comme « changement d'état effectif d'une surface agricole, forestière ou naturelle vers des surfaces *artificialisées* ». Par surface artificialisée, cette définition, issue de *Corine Land Cover*, citée par INRA et IFSTTAR (2017b), entend tous les usages anthropiques, c'est-à-dire « les tissus urbains, les zones industrielles et commerciales, les infrastructures de transport et leurs dépendances, les mines et carrières à ciel ouvert, les décharges et chantiers, les espaces naturels urbains (espaces végétalisés inclus dans le tissu urbain), et les équipements sportifs et de loisirs y compris des golfs » [INRA et IFSTTAR (2017b)]. Pour autant, la notion d'artificialisation recoupe en fait trois principes distincts avec lesquels elle est parfois confondue : l'*imperméabilisation des sols* (entre sols *scellés* et *non scellés*) ; la *perte d'espaces naturels*, forestiers agricoles ; et l'*étalement urbain* [INRA et IFSTTAR (2017b) et Loisier et Petel (2019)]. L'imperméabilisation est le facteur le plus répandu dans le langage courant. Nous retenons une définition intermédiaire plus restrictive que la définition générale proposée par *Corine Land Cover* : un sol est considéré par la suite comme *artificiel* ou *artificialisé* lorsqu'il n'appartient pas à la couche `ZONE VEGETATION` de la BDTOPO de l'IGN [11]. Des parcs ou des espaces naturels aménagés sur le territoire sont donc considérés comme *non artificiels*.

Avec environ 20 000 hectares par an d'espaces naturels transformés selon Fosse, 2019, les surfaces artificialisées sont passées de 20 000 km² à 33 000 km² en trente ans d'après Loisier et Petel, 2019. C'est une dimension importante de l'empreinte anthropique sur les ressources naturelles. Le Fur et Cougny (2019), dans un rapport de *France Stratégie* pour le gouvernement, soulignent ainsi trois conséquences majeures : la perte de biodiversité par la destruction ou la fragmentation de leurs habitats, la hausse des émissions de CO_2 par la baisse des capacités des sols de stockage du carbone, et enfin l'augmentation de la pollution (chimique, industrielle, des transports, etc.). L'artificialisation, en particulier dès lors qu'elle comprend une importante imperméabilisation de la surface, joue également un rôle primordial parmi les facteurs de risques naturels en milieu urbain dont les risques *inondation* et *canicule*. Ainsi, face au risque d'inondation, l'imperméabilisation diminue la capacité des sols à absorber la pluie lors d'épisodes intenses et augmente les eaux de ruissellement. Au cours d'épisodes de forte chaleur [12], les surfaces artificielles (bâtiments, routes, équipements, etc.) absorbent beaucoup

11. La définition des éléments répertoriés dans celle-ci est donnée dans la documentation de la BDTOPO : « espace végétal naturel ou non différencié selon le couvert forestier. » On trouve quelques détails supplémentaires plus loin relatifs aux méthodes de sélection des objets figurant sur la couche `ZONE VEGETATION` : « bois de plus de 500 m² ; forêts ouvertes, landes, vignes et vergers de plus de 5 000 m². L'exhaustivité ne pouvant être assurée en dessous de ces seuils, les sélections sont effectuées de façon à donner une vision représentative du paysage : structure principale d'un réseau dense de haies ou rangées d'arbres ; sélection d'arbres isolés et bosquets en zone urbaine et en zone de végétation clairsemée (maquis, jardins ouvriers…). » Nous avons utilisé la version 2.2 de la BDTOPO, datant d'octobre 2016. Cette base a fait l'objet de plusieurs mises-à-jour depuis et la documentation n'est plus accessible en ligne à l'heure où nous écrivons ces lignes (nous disposons toutefois d'une version archivée du fichier).

12. Voir section II.1.d p. 19 du chapitre 1.

plus la chaleur que les terrains naturels qui la transmettent ou la réfléchissent. Elles contribuent donc à la formation d'îlots de chaleur soit pendant la journée (à cause du manque de végétalisation et d'ombre et des effets de réflexion liés aux surfaces vitrées, métalliques ou claires des bâtiments) soit pendant la nuit (lorsque les bâtiments et les sols réémettent la chaleur emmagasinée pendant la journée). L'artificialisation est également accompagnée de nuisances sonores liées au transport et à la diminution des surfaces captant les sons (les bâtiments et les revêtements artificiels les réfléchissant) [INRA et IFSTTAR (2017b) et Le Fur et Cougny (2019)].

Trois raisons expliquent la croissance de l'artificialisation en France : l'augmentation de la population, la « diminution de la taille des ménages » et la « préférence (…) pour l'habitat individuel », qui conduit à un étalement urbain. Celui-ci advient notamment par la construction de maisons individuelles dispersées et reliées par des routes qui fragmentent les espaces naturels [INRA et IFSTTAR (2017b)]. Ces formes urbaines avec des jardins sont tout de même intéressantes du point de vue de l'artificialisation puisque les jardins présentent des espaces végétalisés en pleine terre et des sols non scellés qui peuvent entrer en synergie avec l'établissement de trames vertes [13] [Liénard et Clergeau (2011) et LPO PACA (2016)]. Néanmoins, ils consomment globalement plus de surface que le logement collectif (en comptant les infrastructures). Cette hausse de l'emprise urbaine est caractérisée par plusieurs points, relevés par le Commissariat général au développement durable (2018) :

- « 73 % des espaces consommés » le sont dans des zones où le marché du logement est équilibré entre offre et demande ;
- 40 % a lieu dans des zones où la « vacance de logements augmente fortement » ;
- 20 % a lieu dans des zones où la « population décroît ».

L'État français a ainsi inclus, dans sa loi biodiversité de 2018, la notion de *zéro artificialisation nette* [Albert (2020), Club Ville Aménagement (2020) et Fabre (2020)]. Ce principe est issu d'un ensemble de mesures récentes liées, que ce soit la *Feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources* de la Commission européenne en 2011, la loi de *modernisation de l'agriculture et de la pêche* de 2010 ou encore la *stratégie nationale bas carbone* de 2015 [Commissariat général au développement durable (2018)]. Le gouvernement précise que l'objectif *zéro artificialisation nette* consiste à « faire en sorte que chaque fois qu'une surface est artificialisée, la même superficie est rendue à la nature ailleurs » [Ministère de la transition écologique et solidaire (2018)].

Derrière cette notion se cachent en pratique plusieurs mécanismes dont : la conservation des aires naturelles existantes ; la mise en place d'espaces naturels plus importants lors de la conception d'espaces publics ; le choix de formes urbaines qui compensent l'artificialisation générale (liée notamment aux transformations de zones ayant changé de destination) et tout en accueillant la dynamique démographique.

13. Celles-ci sont d'ailleurs vues comme des « éléments de la ville durable en gestation » [Stambouli (2012)].

III.2. Objectifs

La visée de ce scénario « *zéro artificialisation nette* » est donc d'illustrer les conséquences potentielles sur l'organisation urbaine et sur les besoins en foncier de l'application à Bordeaux métropole du principe national éponyme.

III.3. Contraintes et développements spécifiques

Zéro artificialisation nette ou pas de baisse des aires végétalisées

La première contrainte est la limitation de l'artificialisation des sols. Pour ce faire, nous avons imposé comme objectif la valeur de référence de l'année 2014 et ajouté comme contrainte à TIMES-URBAN de ne pas dépasser cette valeur seuil. Néanmoins, afin de prendre en compte une forme d'inertie du marché de l'aménagement et l'existence de projets déjà en cours de développement, nous avons considéré que cette valeur ne s'appliquait qu'à partir de 2020. Nous avons laissé une marge de progression potentielle de 10 % en 2015 qui se résorbe linéairement jusqu'en 2020.

Archétype	Aire naturelle (%)
Ville dense proche 1	7,60
Banlieue / petites villes 1	21,10
Zone rurale 1	51,44
Saint-Médard-en-Jalles	90,99
Centre historique	3,22
Ville dense proche 2	10,97
Banlieue / petites villes 2	32,66
Zone d'activités 1	31,17
Zone d'activités 2	16,33
Ville dense proche 3	10,38

TABLEAU 4.6 – Table de la proportion des aires naturelles par archétype.

Le tableau 4.6 présente les caractéristiques de chaque archétype de *forme urbaine* tandis que le tableau 4.7 résume la superficie d'aire naturelle actuelle et celle imposée par zone.

L'ajout d'un coût à l'artificialisation

Concernant les coûts, nous avons rapidement présenté dans la section I.3.b du chapitre 3 les différentes possibilités d'assignation d'un coût aux technologies de formes urbaines. Nous avions alors choisi d'attribuer un coût uniforme à tous les archétypes de formes urbaines. Or, pour rendre compte de l'artificialisation des sols, nous appliquons ici l'hypothèse d'un « *coût écologique* » qui induit la pénalisation d'une trop grande artificialisation des sols.

Un rapport du ministère de l'environnement évalue à environ 1 000 €/ha la « valeur socio-économique » générée par une prairie ordinaire [LOISIER et PETEL (2019)], les études évaluant les coûts des formes urbaines étant très « rares » [INRA et IFSTTAR (2017a)]. En première approximation, nous proposons de considérer

Zone	Contrainte en 2014 (km²)	Contrainte entre 2020 et 2050 (km²)
BDX01	0,1317	0,1463
BDX02	0,3683	0,4093
BDX03	1,0513	1,1681
BDX04	0,5412	0,6013
BDX05	0,6856	0,7618
BDX06	3,7173	4,1303
BDX07	4,1357	4,5953
BDX08	3,5828	3,9808
BDX09	2,1996	2,4440
BDX10	1,3745	1,5272
BDX11	2,9708	3,3009
BDX12	6,9669	7,7410
BDX13	4,6327	5,1474
BDX14	25,4325	28,2583
BDX15	18,3621	20,4024
BDX16	10,7518	11,9465
BDX17	69,9220	77,6911
BDX18	31,2505	34,7228
BDX19	8,8839	9,8710

TABLEAU 4.7 – Contraintes appliquées sur les aires naturelles (en km²) par zone de TIMES-URBAN, en 2014 (gauche) et 2050 (droite).

que la collectivité, en artificialisant un terrain, perd au moins cette valeur de 1 000 €, ce qui permet simplement de pondérer le coût de chaque archétype de sol en fonction du territoire artificialisé par chaque forme. Ces coûts sont présentés dans le tableau 4.8.

Archétype	Surface non artificielle (%)	Coût (k€ / km²)
Ville dense proche 1	8	92,40
Banlieue / petites villes 1	21	78,90
Zone rurale 1	51	48,56
Saint-Médard-en-Jalles	91	9,01
Centre historique	3	96,78
Ville dense proche 2	11	89,03
Banlieue / petites villes 2	33	67,34
Zone d'activités 1	31	68,83
Zone d'activités 2	16	83,67
Ville dense proche 3	10	89,62

TABLEAU 4.8 – Table des coûts des archétypes de formes urbaines.

Les contraintes supplémentaires appliquées à notre modèle dans ce scénario sont donc au nombre de deux :

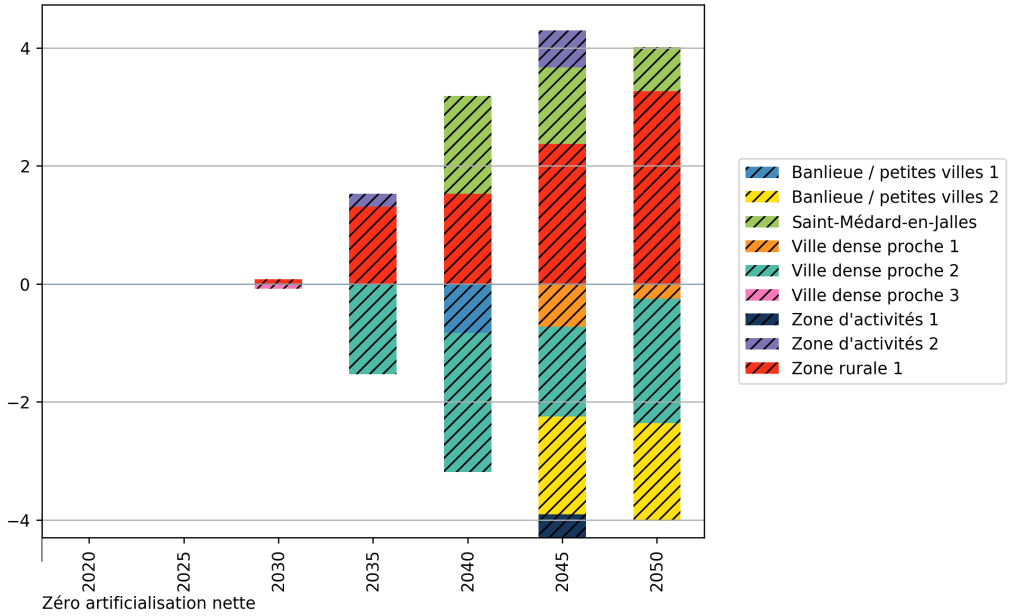
- *Zéro artificialisation nette*, c'est-à-dire que la surface artificialisée nette n'augmente pas à partir de 2020 en prenant comme référence la valeur de 2014 ;
- *Ajout d'un coût* à l'activité des archétypes, coût proportionnel à l'artificialisation liée à chaque archétype.

III.4. Résultats du scénario

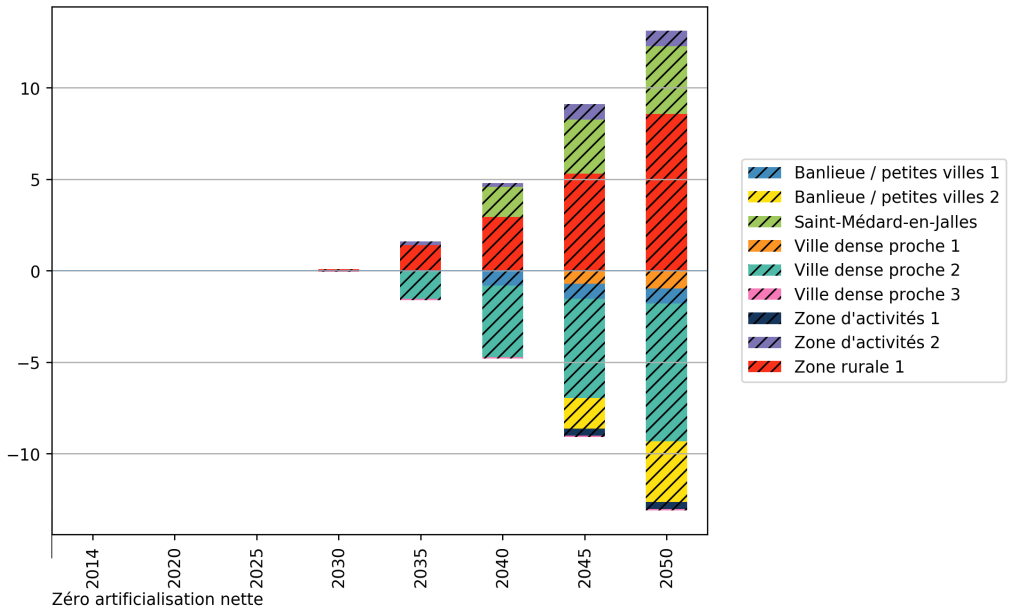
Le scénario *Zéro artificialisation nette* est indiqué par l'acronyme ZAN par la suite.

III.4.a. En sortie de TIMES-URBAN

Occupation du sol



(A) Nouveaux investissements



(B) Superficie utilisée

FIGURE 4.29 – Différences dans l'évolution de l'utilisation des sols en km² dans le scénario ZAN par rapport au scénario de référence Base.

L'ajout d'un coût à l'artificialisation et la demande du respect d'un seuil de *zéro artificialisation nette* conduisent TIMES-URBAN à ne pas investir dans quelques

km² par an de formes *a priori* plutôt denses (*Villes denses proches 1*, 2 et 3 ou *Banlieues / petites villes 1* et 2) : la figure 4.29a montre ainsi que le modèle préfère ainsi investir dans des formes moins denses, qui présentent des surfaces artificialisées moins importantes (environ 91 % de surface naturelle pour l'archétype *Saint-Médard-en-Jalles*, 51 % pour la *Zone rurale* contre 8 % et 10 % respectivement pour les *Villes denses proches 1* et 3 et 21 % et 33 % pour les formes *Banlieues / petites villes 1* et 2 par exemple). Ces modifications commencent à partir de 2030 environ et croissent avec le temps jusqu'à atteindre un changement d'investissement d'environ 4 km² en 2045 et 2050. Cumulées, elles concernent donc un total de 13.11 km² environ de terrains utilisés différemment en 2050 par rapport au scénario de référence (voir figure 4.29b).

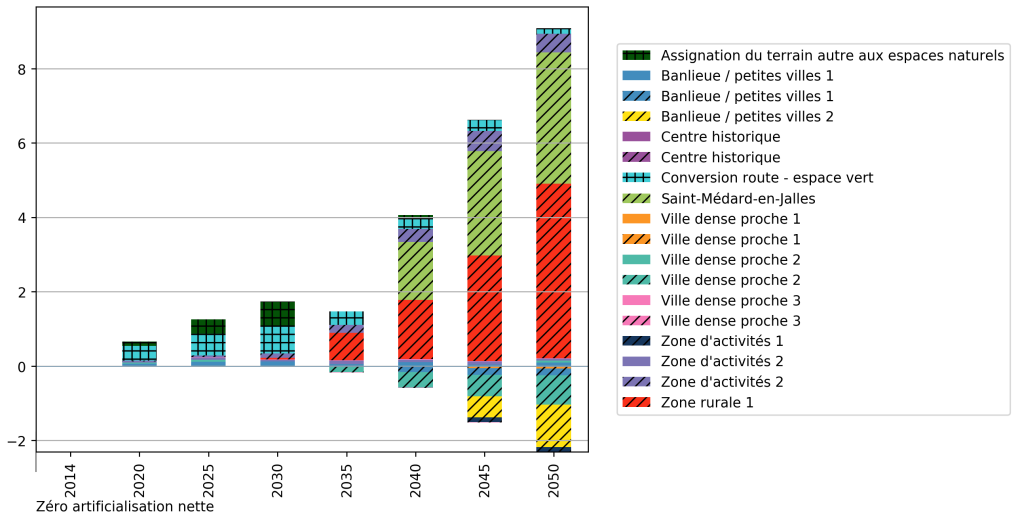
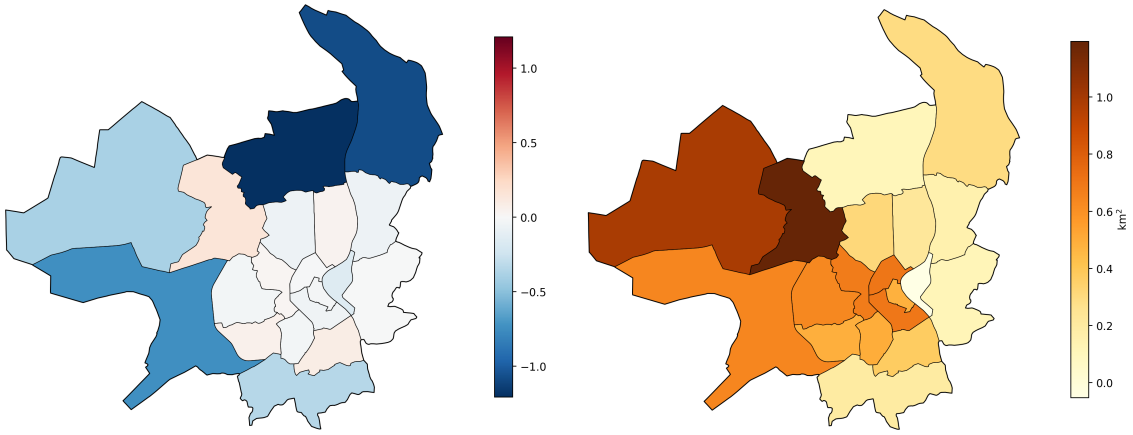


FIGURE 4.30 – Production d'espaces naturels, différence du scénario `ZAN` par rapport au scénario `Base`.

De la sorte, la surface couverte par des espaces naturels, dont l'évolution est visible dans la figure 4.30, augmente au fur et à mesure des années avec un gain total d'environ 9.09 km² en 2050 par rapport au scénario `Base`. On peut mettre ces résultats en relation avec l'évolution de l'occupation des sols du scénario de référence : ces 9.09 km² correspondent à l'augmentation du terrain bâti due au changement d'archétypes entre 2014 et 2050 (donc hors conversion des sols `autres` en sols `bâtissables`) visible sur la figure 4.4 du scénario de référence p. 237.

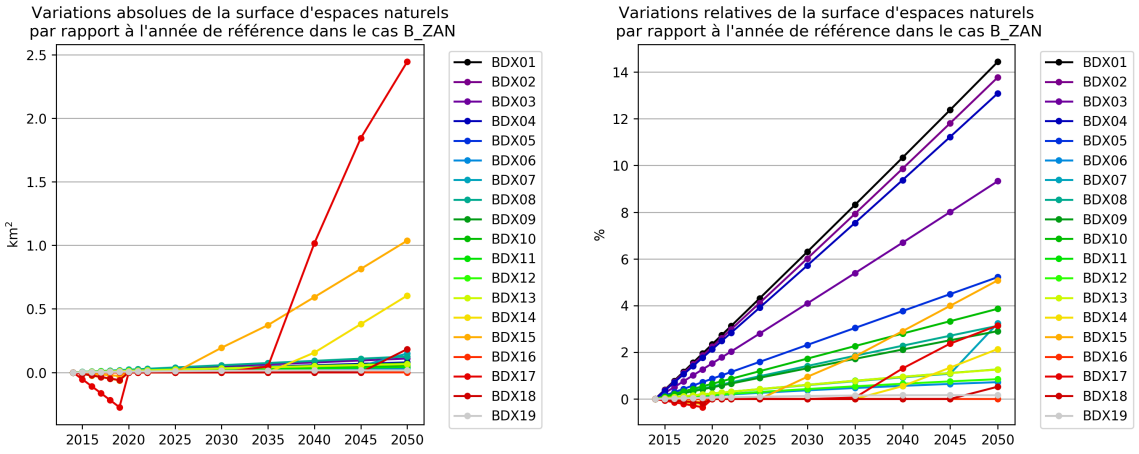
Ces changements ont lieu principalement dans les communes périphériques comme en témoigne la figure 4.31a. Celles-ci voient en outre une baisse de quelques km² de surface bâtie en 2050 par rapport à l'année de référence. Cette variation est assez faible et n'empêche pas que la métropole doive globalement augmenter dans toutes les zones ses terrains bâtis (voir figure 4.31b) et ce en particulier dans l'ouest de la métropole. Ces nouveaux investissements ne concernent pas plus d'un km² en 2050 par rapport à 2014 pour l'immense majorité des zones (sauf une).

Quand on se penche plus précisément sur les changements survenant dans les différentes zones visibles sur les courbes 4.32, on peut remarquer que quelques zones périphériques, de `BDX14` à `BDX18`, profitent de la flexibilité entre 2015 et 2019 (voir figures 4.32a). La plupart des zones toutefois augmentent linéairement



(A) Différence par rapport au scénario `Base` (B) Différence du scénario `ZAN` en 2050 par rapport à 2014

FIGURE 4.31 – Répartition géographique de la production de surface bâtie dans le scénario `ZAN` en 2050 par rapport au scénario `Base` (*gauche*) et par rapport à 2014 (*droite*). Les variations sont liées aux terrains *autres* et à leur conversion en surface bâtie et non à la diminution de la superficie des sols *naturels*.



(A) `ZAN` - En absolu (B) `ZAN` - En relatif

FIGURE 4.32 – Évolution de la surface d'espaces naturels par rapport à l'année de référence 2014 pour l'ensemble des 19 zones dans le scénario `ZAN`.

leurs proportions d'espaces naturels régulièrement, en particulier les zones du centre de la métropole, de BDX01 à BDX05 (voir figure 4.32b).

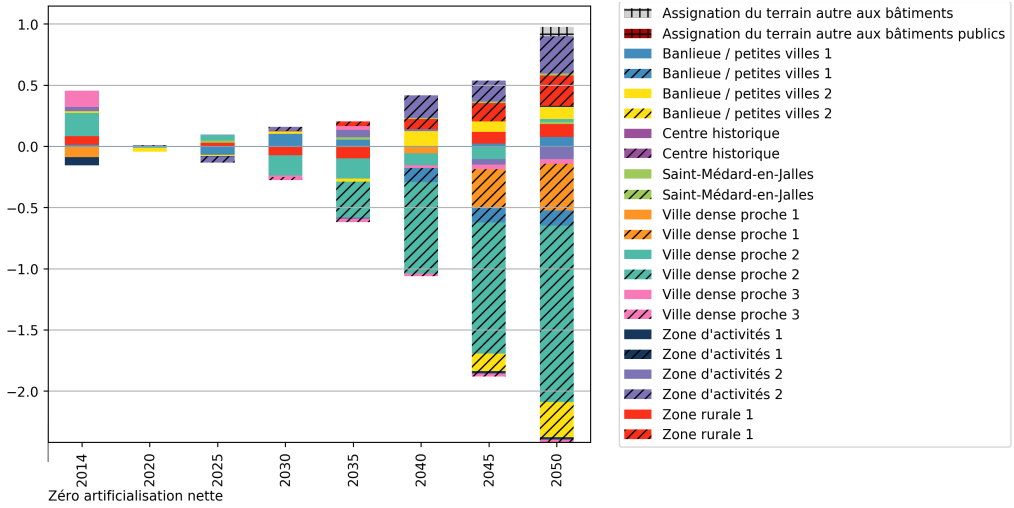


FIGURE 4.33 – Production de terrain bâtissable selon les archétypes.

L'augmentation de la surface d'espaces naturels effective a en outre contribué à diminuer la surface totale *bâtissable*. La figure 4.33 montre une différence d'environ 1.44 km² en 2050 dans le scénario ZAN par rapport au scénario Base. On remarque que certains des archétypes de 2014 sont parfois mis à contribution de façon plus importante, c'est-à-dire que du terrain est converti en terrain bâtissable par ces archétypes *existant* en 2014. Le recours aux terrains *autres* est également utilisée en 2050 pour quelques dizaines d'hectares.

Bâtiments et demande finale

Il y a un surplus de terrain bâti dans la trajectoire du scénario de référence [14]. Il n'est pas nécessaire de modifier l'équilibrage des bâtiments dans ce scénario ZAN où la contrainte est finalement assez faible. La répartition des logements et des locaux d'activités dans TIMES-URBAN est donc très fortement similaire dans le scénario ZAN par rapport au scénario de référence Base.

14. Ce surplus correspond probablement à des décalages légers dans la calibration mais peut aussi correspondre à des bâtiments vacants non répertoriés.

III.4.b. En sortie de URBAN-SPATIALIZER

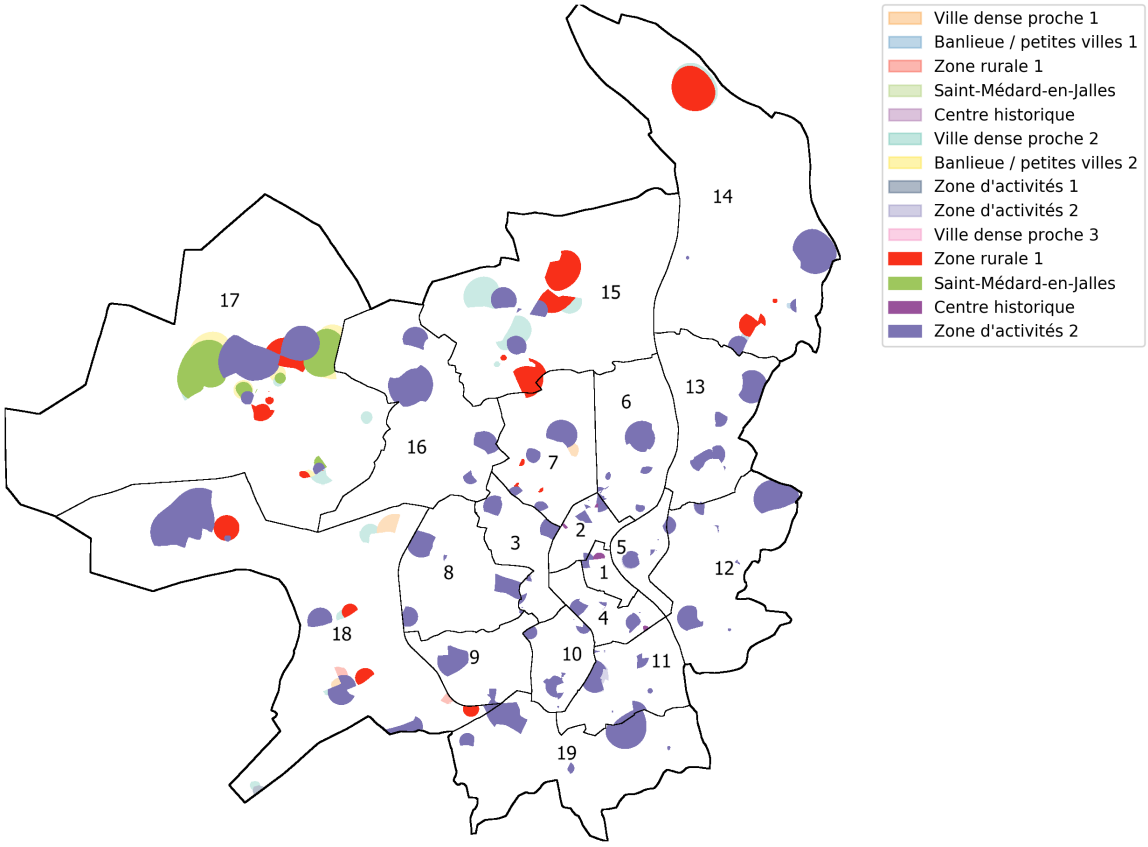
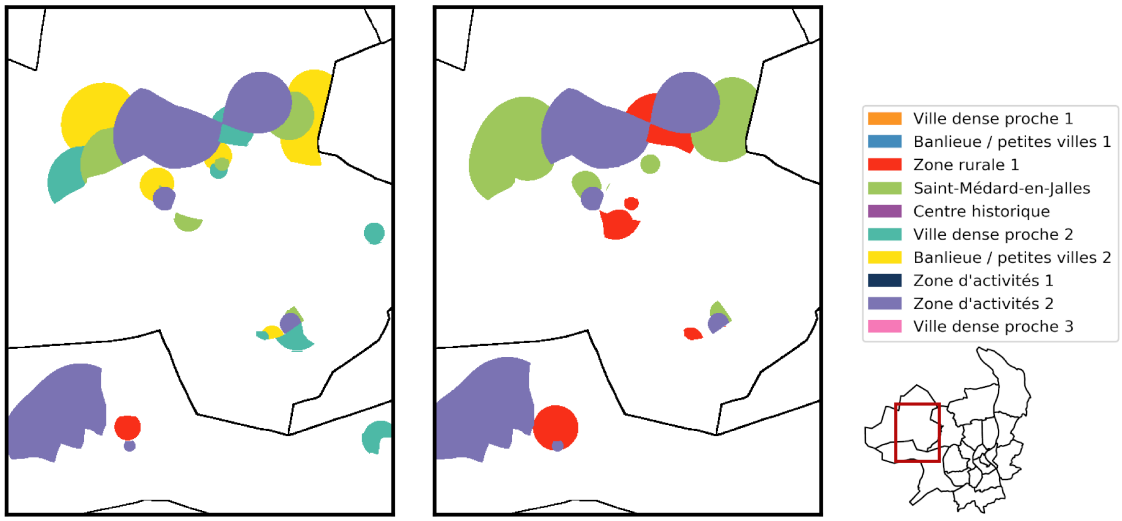


FIGURE 4.34 – Différences de localisation d'archétypes de *formes urbaines* entre 2014 et 2050 dans le cas du scénario ZAN (avec les résultats en 2050 du scénario Base en fond).

Les mêmes cartes de contraintes étant appliquées aux deux cas, les résultats de projection spatiale du scénario ZAN sont relativement similaires à ceux du scénario de référence. La carte 4.34 montre des modifications à peu près aux mêmes emplacements dans la métropole, en particulier pour le déploiement de l'archétype *Zone d'activités 2* sur l'ensemble du territoire. L'archétype *Zone rurale 1* est déployé comme prévu par TIMES-URBAN dans les zones périphériques (BDX14, 15, 17 et 18) et prend soit la place du même archétype déjà présent actuellement [15], soit la place d'archétypes déjà peu denses (*Zone d'activités 1*, *Banlieue / petites villes 2*).

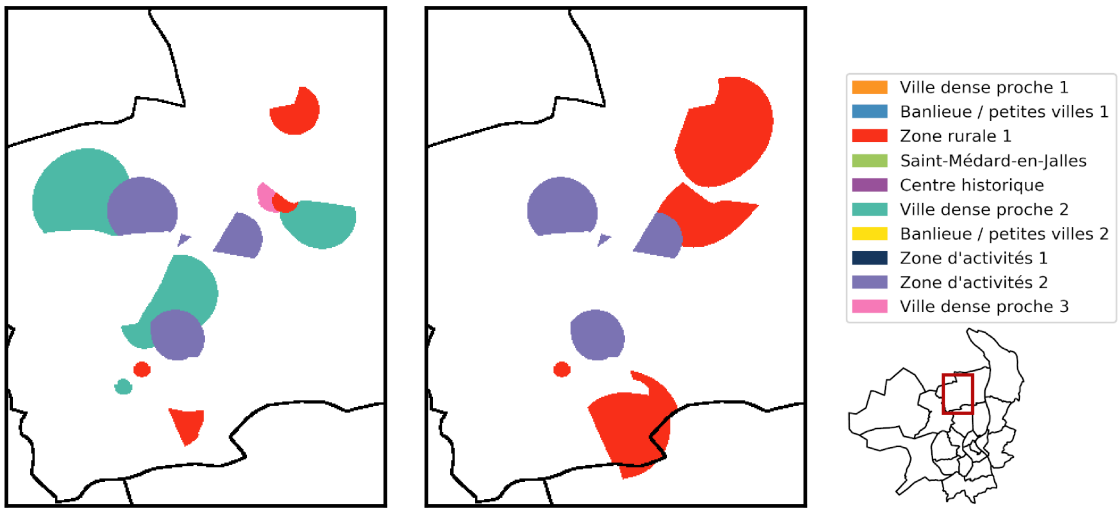
Quand on effectue un zoom sur la portion du territoire qui a été la plus modifiée par TIMES-URBAN entre le scénario Base et le scénario ZAN, comme affiché par la figure 4.35, il apparaît que les mêmes portions du territoire ont été utilisées dans le cadre des investissements, à quelques exceptions près. Les terrains sont occupés par les archétypes, moins nombreux en variété, de la trajectoire de TIMES-URBAN dans le scénario ZAN. On peut également remarquer que le scénario ZAN dispose de moins de zones d'investissement isolées que le scénario Base.

15. Le modèle TIMES-URBAN doit en effet changer une partie du territoire chaque année mais il le fait parfois en remplaçant un archétype présent par le même archétype pour en prolonger la « durée de vie » : c'est ce qu'il se produit ici avec une partie des terrains occupés par *Zone rurale 1*.



(A) Scénario Base (B) Scénario ZAN

FIGURE 4.35 – Différences de localisation d'archétypes à l'ouest de la métropole entre 2014 et 2050 dans le scénario de référence (*gauche*) et dans le scénario ZAN (*droite*).



(A) Scénario Base (B) Scénario ZAN

FIGURE 4.36 – Différences de localisation d'archétypes au nord de la métropole entre 2014 et 2050 dans le scénario de référence (*gauche*) et dans le scénario ZAN (*droite*).

Ce phénomène peut être retrouvé plus à l'est de la zone considérée par la figure 4.35 : la figure 4.36 illustre une situation similaire où les résultats du scénario ZAN sont plus uniformes, moins dispersés, plus regroupés que ceux du scénario Base. À nouveau, des combinaisons de formes urbaines plus ou moins denses, *Zone rurale 1*, *Zone d'activités 2*, *Villes denses proches 1* et 2 dans le scénario Base sont remplacées par les seules *Zone rurale 1* et *Zone d'activités 2*.

Bâtiments

La situation des bâtiments est légérement modifiée dans le scénario ZAN par rapport au scénario de référence mais ces modifications restent mineures.

III.5. Le récit prospectif de la ville future

La loi *zéro artificialisation nette* mise en place par le gouvernement en 2015 avait d'abord surpris les acteurs de l'immobilier et de l'urbanisme : malgré la brutalité de l'annonce et le peu d'années laissées pour l'adaptation, les villes sont parvenues à l'intégrer effectivement dans leurs politiques locales d'aménagement. Néanmoins, les effets ont été radicaux et la loi a permis d'enrayer l'augmentation de l'artificialisation des sols.

Cette contrainte a en effet conduit à un retrait de l'urbanisation des villes périphériques en cours au début des années 2010 au profit d'une transformation des terrains déjà imperméabilisés et utilisés par des constructions humaines. Les communes du pourtour de la métropole ont vu ainsi une baisse de plusieurs hectares de l'artificialisation par l'arrêt des projets immobiliers de grande ampleur qui n'intégraient pas une démarche pro-active de préservation de la biodiversité et des espaces naturels. Les communes de Saint-Médard-en-Jalles et de Saint-Aubin-de-Médoc ont été pionnières dans cette démarche avec le lancement d'études puis de chantiers sur plusieurs centaines d'hectares de formes urbaines réconciliant densité et respect des forêts et écosystèmes locaux.

Les espaces naturels ont donc été peu mis sous tension entre 2020 et 2050, en particulier dans les zones périphériques de l'ouest et du nord de la métropole où les forêts sont habituellement grignotées par l'urbanisation et l'étalement urbain. Ce maintien et l'ajout sporadique d'espaces naturels dans les zones centrales du territoire ont contribué à réduire l'intensité des îlots de chaleur urbains malgré les hausses des épisodes caniculaires.

Dans le reste du territoire, en particulier dans les villes intérieures à la rocade de Bordeaux, l'aménagement se fait de façon plus classique sur plusieurs années voire décennies par des ZAC en collaboration avec les promoteurs immobiliers sur des étendues variant de quelques hectares à parfois près d'un km^2. Des efforts de rénovation énergétique ont été faits dans le centre historique de la ville afin de s'assurer de la pérennité des bâtiments.

IV. **Scénario** : densification autour des axes de transport

IV.1. Contexte

Une étude qui intéresse particulièrement les urbanistes est la possibilité de concentrer les changements autour des axes de transport en commun, par une densification dans des zones déjà pourvues en équipements de mobilité. Ces équipements demandent en effet de forts investissements de la part de la collectivité (en particulier les lignes ferroviaires de toutes sortes). La présence d'arrêts ou de stations à proximité ne conduira certes pas mécaniquement à une diminution de la part du véhicule personnel dans les déplacements – d'autres facteurs tels que le coût, les horaires, les infrastructures routières, l'accessibilité des bassins d'emplois ou des lieux attractifs (sportifs, culturels et autres)… influencent aussi ce choix – mais elle offrira la possibilité et le support nécessaires à la mise en œuvre de ce changement de comportement.

Une question de justice sociale

Un problème d'égalité sociale se trouve également derrière cette notion de disponibilité des transports publics. Un accès inégal aux moyens de transports [16], peut conduire à développer un manque important de moyens de transport et de déplacements [17], voire à un enfermement social dû au faible accès à des lieux d'emplois, de loisirs, etc. [Lucas (2012), Martínez et al. (2018) et Sanchez (2002)]. Les questions environnementales et économiques sont capitales mais il ne faut pas négliger la dimension sociale qui est parfois trop ignorée ou minorée par les politiques publiques [18] [Lucas (2012) et Stjernborg et Mattisson (2016)]. En particulier, les populations en milieu urbain à plus faibles revenus [19], et qui possèdent donc généralement moins souvent de voiture, sont les plus concernées par ce besoin d'un réseau efficace, étendu et accessible (à la fois spatialement et financièrement). Or, l'étalement urbain rend de plus en plus ardu l'exercice de couverture équitable du territoire par les puissances publiques [Sanchez (2002)]. Vu la place prépondérante occupée par le transport dans le quotidien des habitants, il arrive donc légitimement que les phases de conception d'un quartier soient retardées ou conditionnées par l'attente de la décision de projets de prolongation ou d'ajouts de lignes (de tramway, de métro, de bus).

Quant aux effets structurants des axes de transport

Cette problématique de déterminer « *qui du transport en commun ou de la population doit arriver en premier* », ou des relations entre les politique de construction et de transport, renvoie finalement à la question des « *effets structurants* » des

16. Cette situation est généralement désignée par l'expression « *transportation inequality* » dans la littérature scientifique [Lucas (2012)].
17. Ou « *transportation poverty* » [Lucas (2012)].
18. Voir section II.2 au chapitre 1, p. 23.
19. D'autres facteurs peuvent intervenir également dans cette inégalité d'accès aux transports, dont les discriminations raciales ou homme-femme [Lucas (2012)].

infrastructures [Offner (1993, 2014)] et des équipements publics (culturels ou scolaires) [Tobelem et Thuriot (2019)]. Cette thèse stipule que construire de nouvelles infrastructures importantes (autoroutes, lignes à grande vitesse, tramway, aéroport, etc.) attire mécaniquement le développement urbain et structure l'essor des territoires. Alors que cette notion semble profondément ancrée dans beaucoup d'imaginaires et qu'elle fait office de mythe (autour du TGV par exemple mais aussi plus récemment du Grand Paris Express), elle n'a jamais été complètement démontrée [Offner (2014)]. Il faut noter qu'il existe toutefois une forme de permanence des infrastructures qui deviennent des facteurs d'irréversibilité de l'aménagement d'un territoire [Kaufmann et Sager (2009)] : il semble en effet insurmontable de déconstruire la dépendance d'une ville à ses lignes de métro en étoile, son boulevard périphérique ou sa rocade. Offner (1993) remarque également que les projets d'urbanisme sont devenus *de facto* de plus en plus des projets *autour* des infrastructures. La construction d'équipements autour de ces axes, qui peut témoigner d'un esprit pratique, n'est pas sans poser un risque de gentrification [Watson (2009)]. L'évolution de Budapest montre en outre que les lignes de métro n'ont pas semblé affecter le développement des centres. S'ils se sont organisés pour obtenir la ville actuelle, c'est plutôt pour des raisons historiques et culturelles à travers l'héritage d'anciens villages situés aux emplacements des quartiers de la ville [Losonczy (2020)]. Cette conclusion semble plutôt s'appliquer aux pays de l'est d'après l'autrice mais souligne l'importance d'une analyse multi-factorielle qui ne soit pas centrée uniquement sur les transports ou des questions économiques.

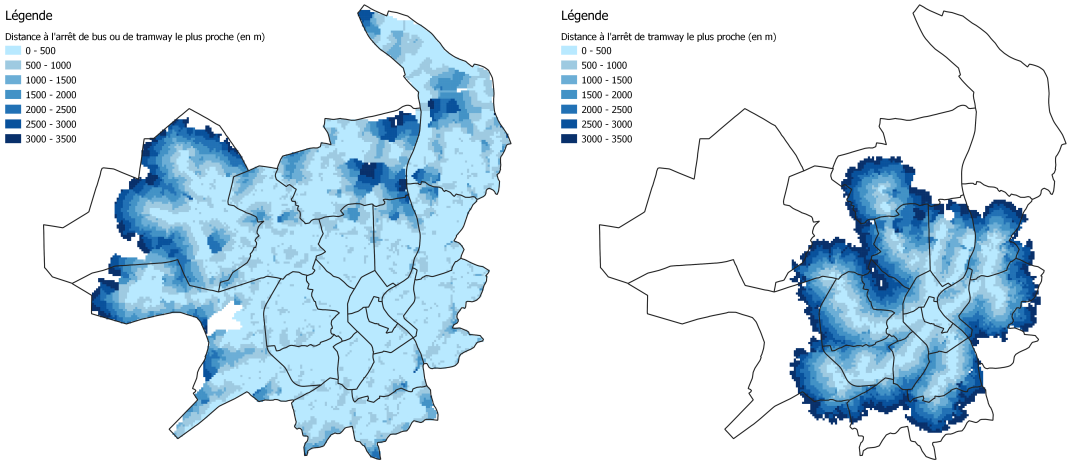
Ce bref aparté sur les effets structurants des axes de transport nous pousse à nous demander si l'on doit expliquer le développement urbain par celui des infrastructures de transport. Pour autant, du point de vue des urbanistes, c'est plutôt l'interrogation inverse qui prime : peut-on mettre à profit les objets existants pour éviter de nouveaux investissements et permettre tout de même une accessibilité correcte en transports en commun. Ainsi, il paraît intéressant de tirer parti des infrastructures existantes et de chercher à développer les zones qui leur sont proches plutôt que de continuer à étaler un territoire ou à lancer de nouveaux chantiers pour le transport. L'idée de *rentabiliser* au maximum les investissements réalisés précédemment est un ressort qui peut intéresser les décideurs publics et permettre de s'assurer de la qualité du quadrillage des transports publics en ville, parmi les zones de logements et d'emplois en particulier. De telles améliorations aident à lutter contre l'exclusion, les inégalités sociales et les mauvaises conditions de vie tout en favorisant potentiellement un recours plus régulier aux transports en commun par rapport à la voiture, avec en sus des bénéfices environnementaux et sanitaires. Il convient enfin de noter que les transports publics peuvent ne pas être la seule solution et que leur développement peut être accompagné par le déploiement de moyens informels (réseaux de covoitureurs, d'auto-stop organisé, etc.) parfois efficaces pour la réduction des inégalités [Lucas (2012)].

À la lumière des éléments soulignés précédemment, nous proposons d'explorer un scénario spécifique autour du transport.

IV.2. Objectifs

Ainsi, pour réaliser un exercice de prospective relatif à cette problématique des infrastructures, nous avons formulé la question de la façon suivante : **en favorisant les abords des stations existantes de transport en commun, à quel point le développement futur de la métropole est-il possible ? Dans quelle mesure est-il impacté par ce choix ?**

IV.3. Contraintes et développements spécifiques



(A) Bus et tram (B) Tram seul

FIGURE 4.37 – Carte de proximité aux arrêts de transport en commun.

Pour ce faire, nous créons une carte des zones permises à partir du calcul de proximité [20] dans le cas des arrêts de tramway seuls, et une seconde dans le cas des arrêts de bus et de tramway (voir figure 4.37), en appliquant simplement un seuil sur toutes les zones à moins de 3,5 km de trajet des arrêts de stations.

Deux options s'offrent pour la représentation dans TIMES-URBAN d'une telle problématique : d'une part, imposer une contrainte stricte au modèle qui restreint les modifications aux zones accessibles seules ; d'autre part, *favoriser* le développement par une réduction des coûts à l'intérieur de ces zones. Cette deuxième proposition est plus réaliste et flexible. En diminuant le coût des archétypes s'installant à proximité des axes de transport [21], la densification autour de ces derniers est favorisée. Le reste du territoire continue d'être disponible pour des investissements supplémentaires mais à un coût plus élevé. De la sorte, TIMES-URBAN est contraint moins strictement et l'on obtient des réponses plus riches [22]. L'arbitrage pourra par exemple répondre aux questions suivantes : quelles formes

20. Voir section III.1.c p. 128 du chapitre 2 pour plus de détail sur la méthode employée pour obtenir ces cartes de proximité orthodromique.

21. Pour traduire l'esprit de la contrainte dans le framework TIMES, nous avons dupliqué les process précédemment créés : les doublons sont strictement identiques aux process originels mais voient leurs coûts diminués d'une valeur arbitraire de 10%. L'utilisation des doublons est donc limitée à une superficie maximale totale par zone (voir tableau 4.9).

22. Dans le cas d'une contrainte stricte de surfaces *autorisées* et de surfaces *interdites*, les réponses obtenues pourraient être résumées à « *oui*, c'est possible » ou « *non*, c'est infaisable ».

urbaines ou quels bâtiments sont choisis pour aller où, et quand ? Le tableau 4.9 résume les aires accessibles par zone retenues dans TIMES-URBAN.

Zone	Surface accessibles par bus/tram (km²)	Surface accessibles par tram (km²)
BDX01	2,897	2,897
BDX02	5,293	5,293
BDX03	10,112	6,242
BDX04	7,155	7,155
BDX05	6,242	6,242
BDX06	17,937	16,720
BDX07	19,446	18,271
BDX08	20,165	19,059
BDX09	11,998	11,998
BDX10	8,353	8,344
BDX11	14,093	13,840
BDX12	29,242	17,164
BDX13	22,007	13,114
BDX14	74,019	0
BDX15	54,406	13,066
BDX16	36,414	8,328
BDX17	71,860	0
BDX18	75,719	13,571
BDX19	33,764	9,425
Total	*521.123*	*190,728*
soit…	96 %	35 % *…de la surface totale*

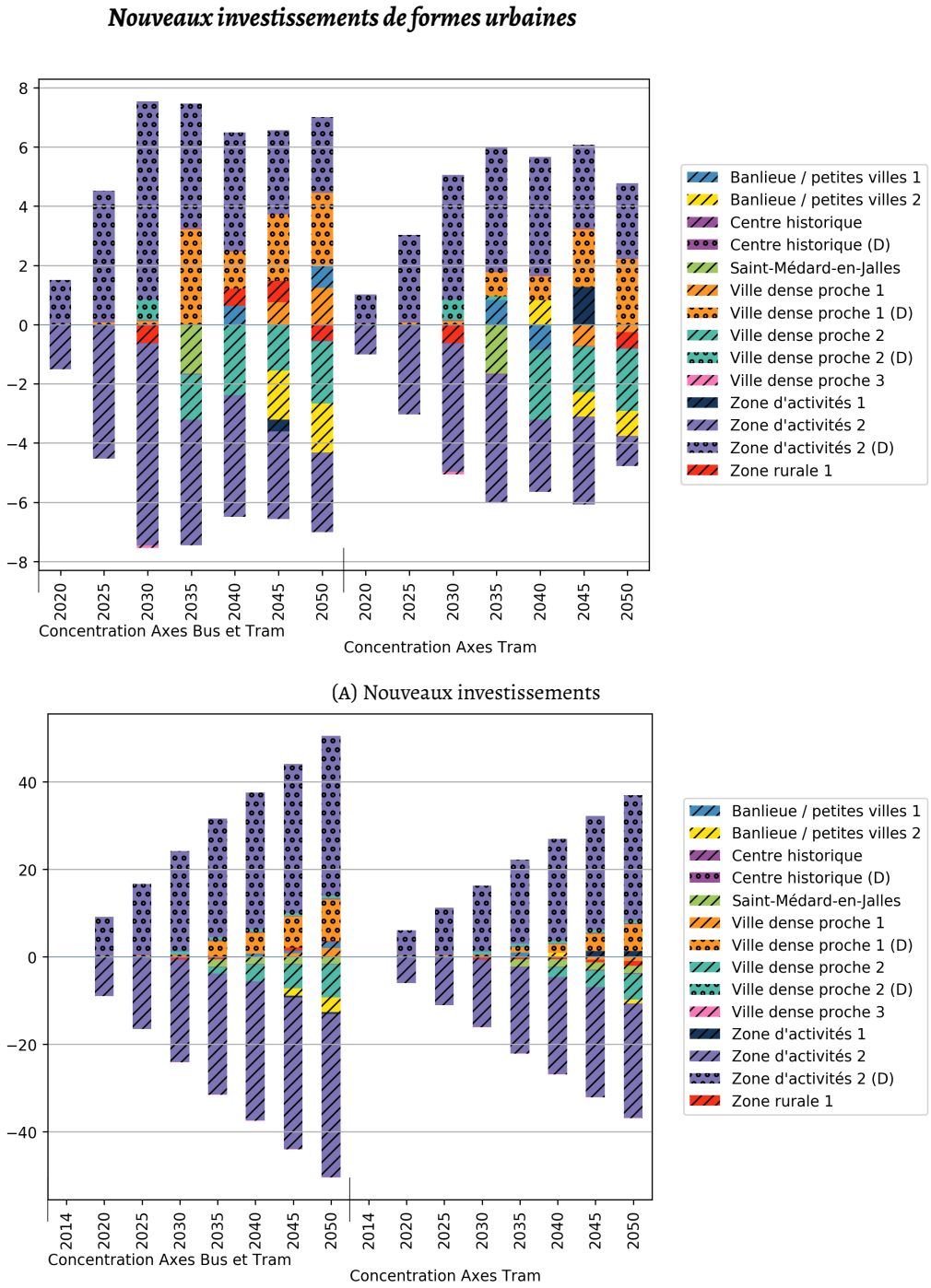
TABLEAU 4.9 – Aires accessibles aux transports en commun.

De plus, les cartes de probabilité sont ajoutées en contraintes à URBAN-SPATIALIZER (voir figure 4.37). On a ainsi deux scénarios supplémentaires, l'un avec les surfaces correspondant à l'accès aux arrêts de bus et de tramway, appelé BT par la suite, l'autre avec celles pour les arrêts de tramway seuls, appelé T par la suite.

Lorsque les investissements ont lieu à proximité des arrêts de transports en commun, l'archétype sera suffixé sur les graphiques et cartes par le symbole D entre parenthèses (par exemple, *Zone rurale 1* devient *Zone rurale 1 (D)*).

IV.4. Résultats du scénario

IV.4.a. En sortie de TIMES-URBAN



(A) Nouveaux investissements

(B) Superficie utilisée

FIGURE 4.38 – Différences dans l'évolution de l'utilisation des sols dans les deux scénarios (BT et T) par rapport au scénario de référence Base en km² utilisé chaque année

Comment les investissements ont-ils évolué dans les scénarios BT et T ? Les graphiques de la figure 4.38 présentent les différences dans les investissements et l'utilisation des sols entre les deux scénarios et le scénario de référence. Ce sont globalement des archétypes de formes urbaines similaires qui sont mis à

contribution, à savoir l'archétype *Zone d'activités 2* et celui de *Ville dense proche 1*. Néanmoins, on peut constater que les deux situations conduisent à investir un peu plus (de l'ordre d'un km² sur la période 2014-2050) dans des archétypes utilisés dans le scénario de référence, à savoir les archétypes *Zone rurale 1* et *Banlieue / petites villes 1* et 2. L'archétype *Ville dense proche 2* est bien moins déployé qu'il ne l'était dans le scénario Base bien qu'il soit employé en 2030 dans les zones proches des axes.

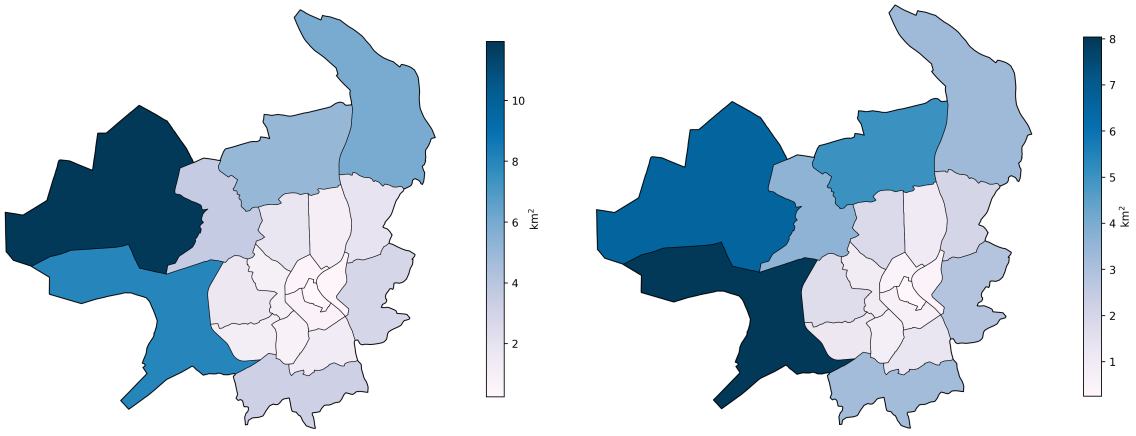
Année	BT	T	BT − T
2020	1,508	1,012	*0,497*
2025	4,525	3,035	*1,490*
2030	7,542	5,058	*2,484*
2035	7,459	6,015	*1,444*
2040	6,489	5,657	*0,832*
2045	6,569	6,072	*0,496*
2050	7,009	4,776	*2,233*

TABLEAU 4.10 – Changements d'investissements par année dans chacun des deux scénario BT et T par rapport au scénario de référence Base (en km²). Ce tableau est la somme des valeurs dans chaque colonne de la figure 4.38a. Voir la note de bas de page 2 p. 237 pour plus de détails sur les différences de niveaux d'investissements entre les années affichées dans ce tableau.

Le scénario T est lié à moins de changements d'occupation par rapport au scénario de référence que le scénario BT comme le montrent les figures 4.38 et le tableau 4.10. Il s'agit de plusieurs dizaines d'hectares par période de 5 ans avec un maximum de 2.48 km² en 2030. Plus précisément, le scénario T choisit un mix d'investissements légèrement différent de ceux privilégiés par BT par rapport à Base : TIMES-URBAN n'utilise ainsi pas l'archétype *Zone rurale 1*, ni *Ville dense proche 1* en-dehors des zones proches des axes, dans le scénario T mais remplace ces deux archétypes par les archétypes *Banlieue / petites villes 2* et *Zone d'activités 1*. Les changements n'ont pas lieu exactement au même moment non plus, le palier d'investissements étant atteint plutôt vers 2035 dans le scénario T contre 2030 dans le scénario BT.

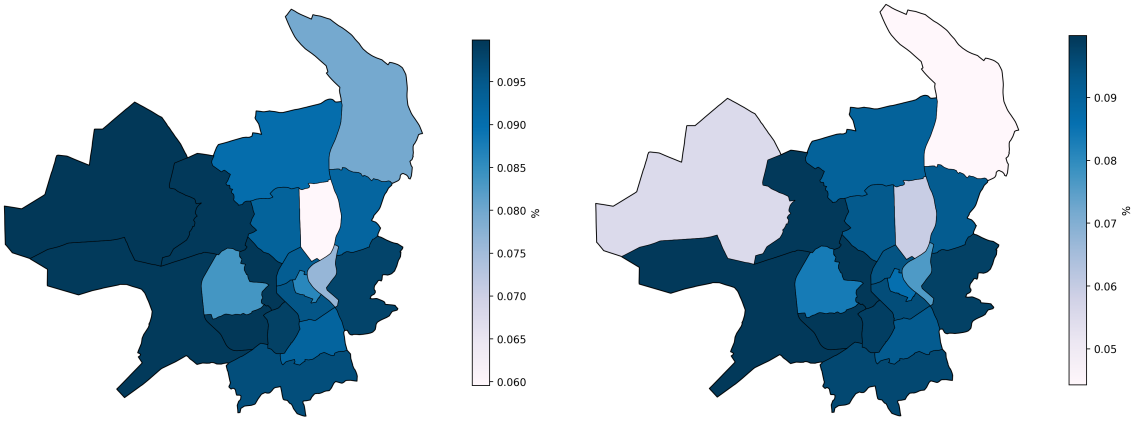
Ce sont principalement les territoires de l'extérieur de la métropole qui sont *a priori* concernés par une augmentation de la production de bâti. Les cartes affichées sur les figures 4.39a et 4.39b résument ainsi les différences en 2050 par rapport à 2014 et soulignent l'importance des territoires en périphérie tandis que les zones du centre de la métropole (Bordeaux, Talence) et en moindre partie le nord ne voient qu'une augmentation très faible. Ces différences sont atténuées quand on regarde la situation relativement aux superficies des zones comme en témoignent les figures 4.39c et 4.39d qui dessinent une carte bien plus équilibrée même si les territoires de l'ouest restent globalement plus marqués tout comme la zone BDX12 à l'est. La seule portion de la métropole qui n'est dans aucun des cas modifiée de façon significative est celle du nord de la ville de Bordeaux, BDX06. La différence majeure entre le scénario BT et celui T est le comportement des zones BDX14 au nord-est et BDX17 au nord-ouest : là où ces deux zones sont largement mises à contribution dans le scénario BT (avec resp. 5.945 et 11.938 km², soit 7.963 et 9.978 %), elles le sont mais de façon bien moins importante, presque divisée par deux dans le scénario T (avec resp. 3,303 et 6,632 km², soit 4,424 et 5,543 %).

Quand on étudie plus précisément la production de terrain bâtissable par les archétypes (cf. figure 4.40), on peut constater plusieurs faits notables :



(A) Changements absolus, scénario BT

(B) Changements absolus, scénario T



(C) Changements relatifs, scénario BT (échelle 1)

(D) Changements relatifs, scénario T (échelle 1)

FIGURE 4.39 – Changements absolus (*haut*) et relatifs (*bas*) d'occupation des sols en cumulé dans les scénario BT (*gauche*) et T (*droite*) par rapport au scénario de référence `Base`.

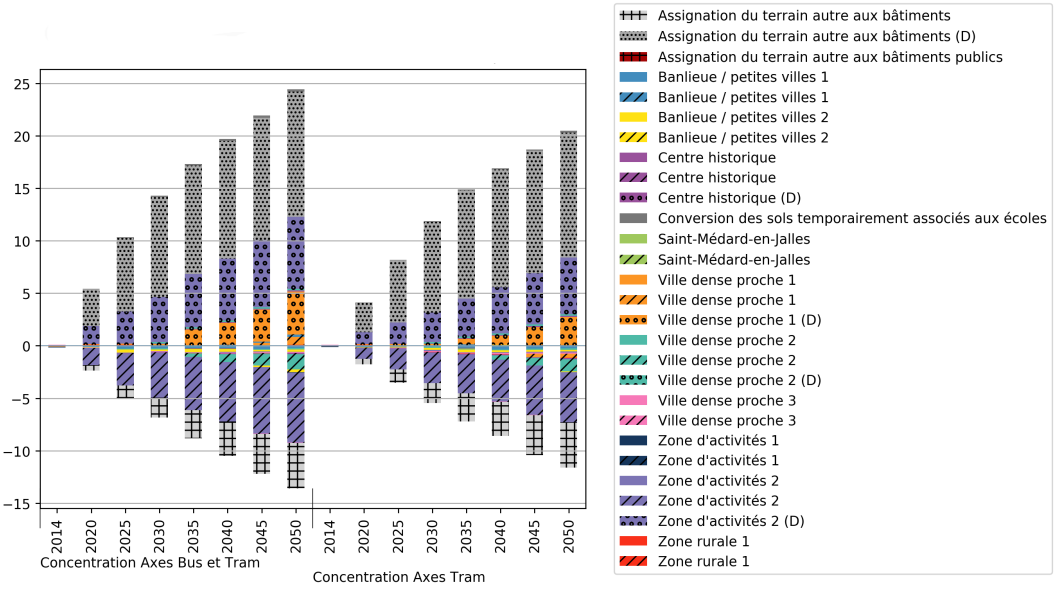


FIGURE 4.40 – Productions totales de terrain bâtissable selon les archétypes sur les trois scénarios.

- tout d'abord, la conversion de terrains dits *autres* en terrain *bâtissable* est largement utilisée dans tous les scénarios, comme elle l'était dans le scénario `Base` ;
- ce phénomène est mis bien plus à profit dans les scénarios BT et T avec 14.577 km² de conversion en 2050 contre 6.979 km² dans le scénario de référence ;
- les deux scénarios de densification autour des axes de transport voient également une faible hausse de la production par des archétypes *urbains* (*Ville dense proche 1*) ;
- le niveau de production de terrain bâti est supérieur par rapport au scénario de référence, le scénario BT montrant une valeur plus élevée que celui T.

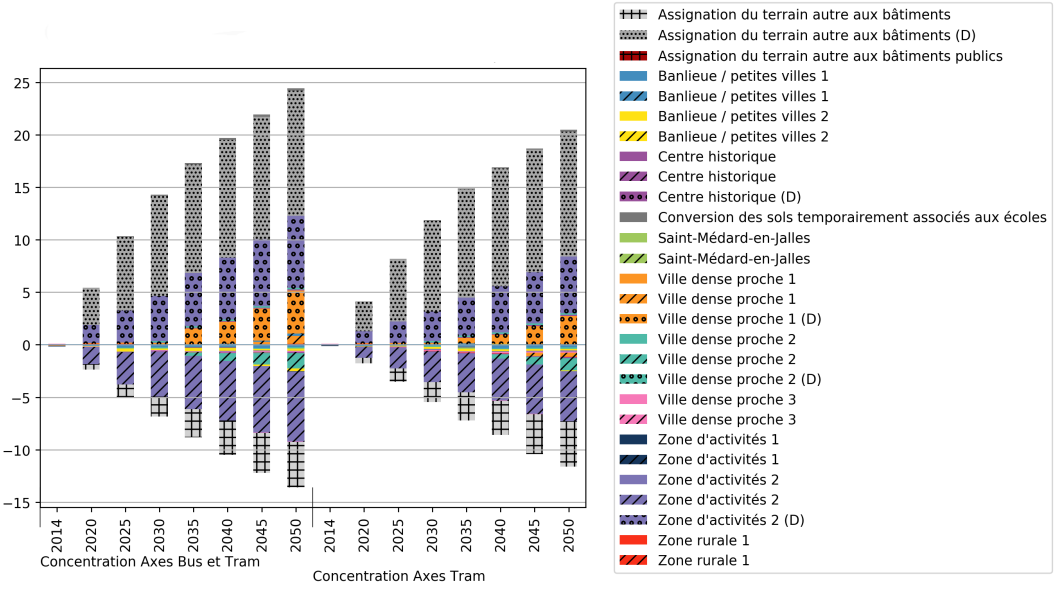


FIGURE 4.41 – Différences des scénario BT et T par rapport au scénario `Base`.

On peut remarquer également, élément plus visible sur la figure 4.41, que les terrains bâtis produits par les changements d'archétypes sont concentrés en grande partie dans les zones proches des axes de transport, dans un cas comme dans l'autre. Si l'on regarde plus spécifiquement la saturation des zones à proximité d'arrêts dans le tableau 4.11, on peut remarquer qu'aucun territoire de proximité n'est saturé par les nouveaux investissements entre 2014 et 2050, à part les zones qui ne présentent *aucun* accès aux transports en commun (BDX14 ou BDX17).

Quant aux espaces naturels, les deux scénarios BT et T perdent de la superficie par rapport au scénario `Base` comme le montre le graphique 4.42 : dans le scénario BT, 7.322 km² sont produits par les archétypes qui ont été choisis plutôt que ceux du scénario de référence qui produisaient 9.802 km², ce qui correspond à une perte de 2.480 km² ; dans le scénario T, 5.767 km² contre 7.294 km² dans le scénario `Base`, soit 1.527 km² de moins. Les archétypes dans lesquels TIMES-URBAN a investi pour les cas de densification (*Ville dense proche 1*, *Banlieue / petites vilels 1*, *Zones d'activités 1* et 2) produisent en effet peu de surfaces végétales par km².

La figure 4.43 représente les évolutions de la production d'espaces naturels dans les trois cas étudiés ici, en relatif et en absolu par rapport à l'année de référence (2014). On peut constater, de façon très similaire au scénario de référence (voir figures 4.43a et 4.43b), qu'un petit nombre de zones (BDX15, BDX17, BDX18) perdent

en km²	*cas* BT	*seuil*	*cas* T	*seuil*	*cas* Base
BDX01	0,249	2,897	0,249	2,897	0,249
BDX02	0,498	5,293	0,498	5,293	0,498
BDX03	1,010	10,112	1,010	6,242	1,010
BDX04	0,682	7,155	0,682	7,155	0,682
BDX05	0,476	6,242	0,476	6,242	0,476
BDX06	**1.068**	17.937	**1.068**	16.720	**1,498**
BDX07	1,804	19,446	1,804	18,271	1,804
BDX08	**1.685**	20.165	**1.685**	19.059	**2,004**
BDX09	1,198	11,998	1,198	11,998	1,198
BDX10	**0.823**	8.353	**0.823**	8.344	**0,834**
BDX11	1,302	14,093	1,302	13,840	1,302
BDX12	2,865	29,242	2,865	17,164	2,865
BDX13	2,029	22,007	2,029	13,114	2,029
BDX14	**3.911**	74.019	**0.000**	0.000	**5,945**
BDX15	5,050	54,406	5,050	13,066	5,050
BDX16	3,627	36,414	3,627	8,328	3,627
BDX17	**7.436**	71.860	**0.000**	0.000	**11,938**
BDX18	8,037	75,719	8,037	13,571	8,037
BDX19	3,257	33,764	3,257	9,425	3,257
Totaux	47,007	-	35,660	-	54,303

TABLEAU 4.11 – Investissements totaux dans chacune des zones en 2050 des archétypes *proches des axes* de transport dans les scénario BT et T ainsi que les seuils de superficies proches des arrêts de transports en commun. Les valeurs totales d'investissement du scénario Base sont indiquées dans la dernière colonne. Comme nous l'avons vu au début de cette partie sur la figure 4.38a, ces archétypes proches des axes sont complétés dans les deux scénarios BT et T par des archétypes « normaux » hors des zones d'influence des transports en commun, ce qui explique les différences de totaux. Les valeurs en **gras** sont celles qui sont distinctes dans l'un ou l'autre des trois scénarios.

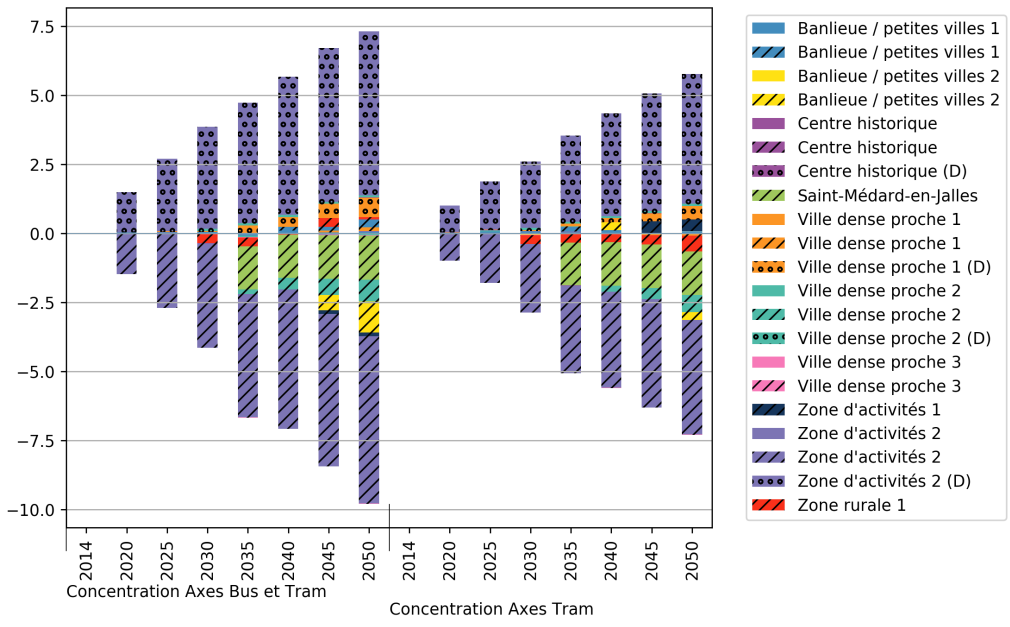
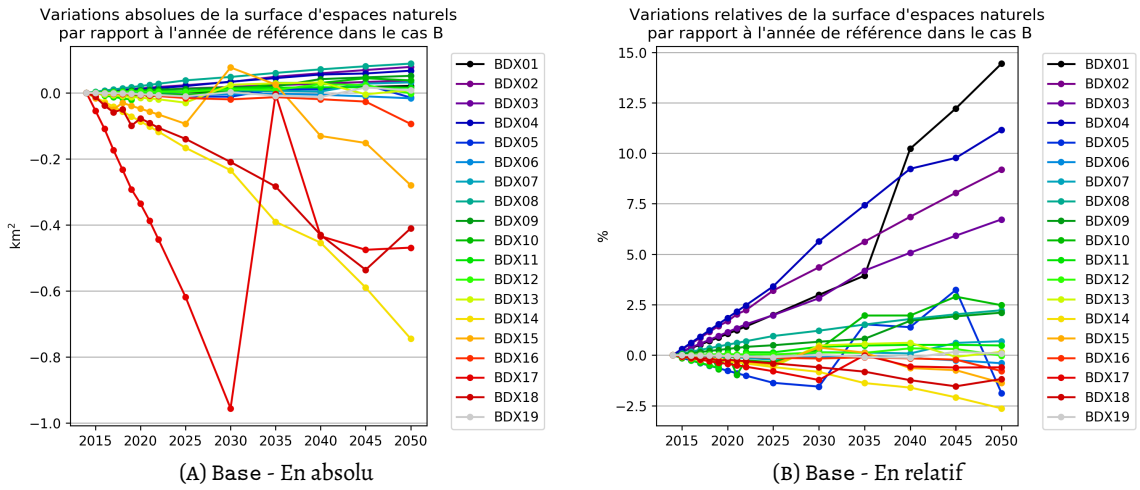
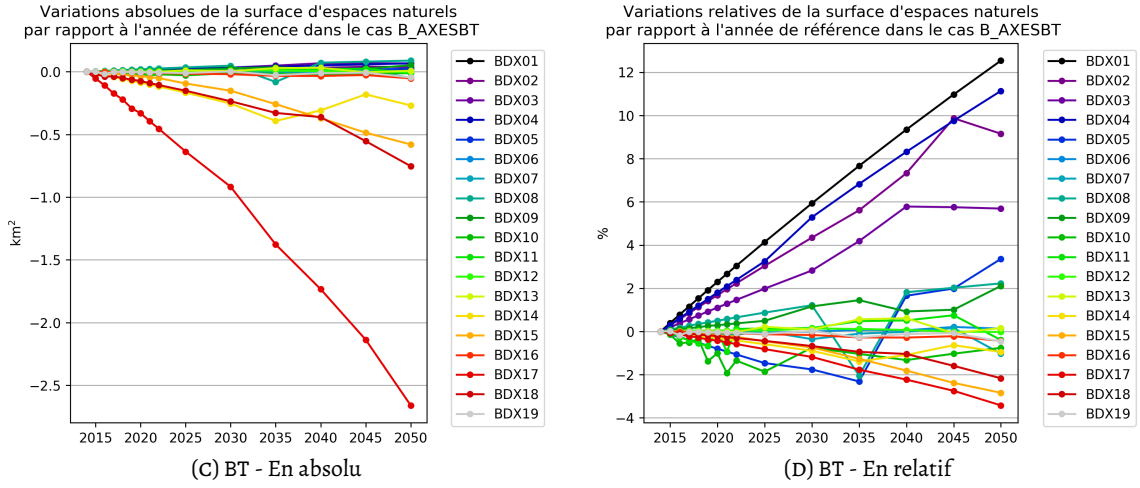


FIGURE 4.42 – Production d'espaces naturels, différences par rapport au scénario Base.



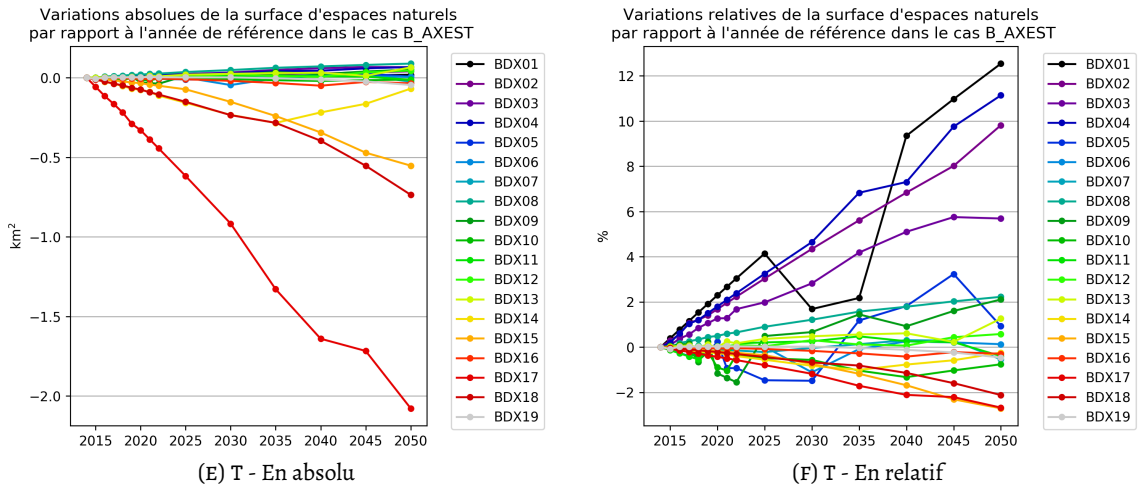
(A) Base - En absolu

(B) Base - En relatif



(C) BT - En absolu

(D) BT - En relatif



(E) T - En absolu

(F) T - En relatif

FIGURE 4.43 – Évolution de la surface d'espaces naturels par rapport à l'année de référence 2014 pour l'ensemble des 19 zones dans les trois scénarios (Base, T, BT).

dans les deux scénario BT et T une superficie bien plus importante que les autres (voir figures 4.43e et 4.43c). Les valeurs relatives montrent plutôt une croissance des zones centrales et denses de la métropole de plusieurs points jusqu'à 12 % (voir figures 4.43f et 4.43d), valeur inférieure à l'augmentation visible dans le scénario Base (voir figure 4.43b).

Bâtiments

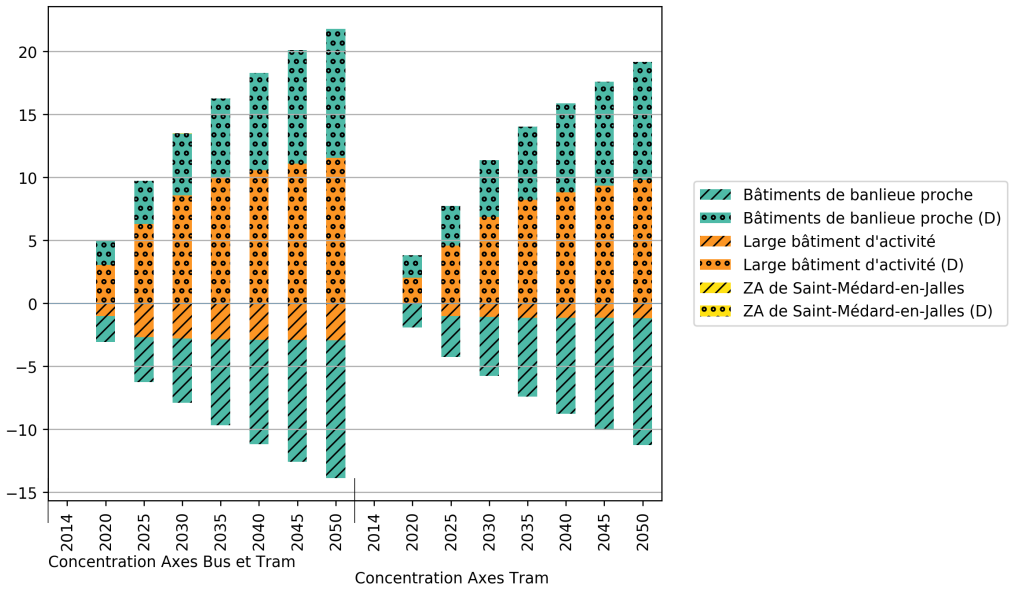
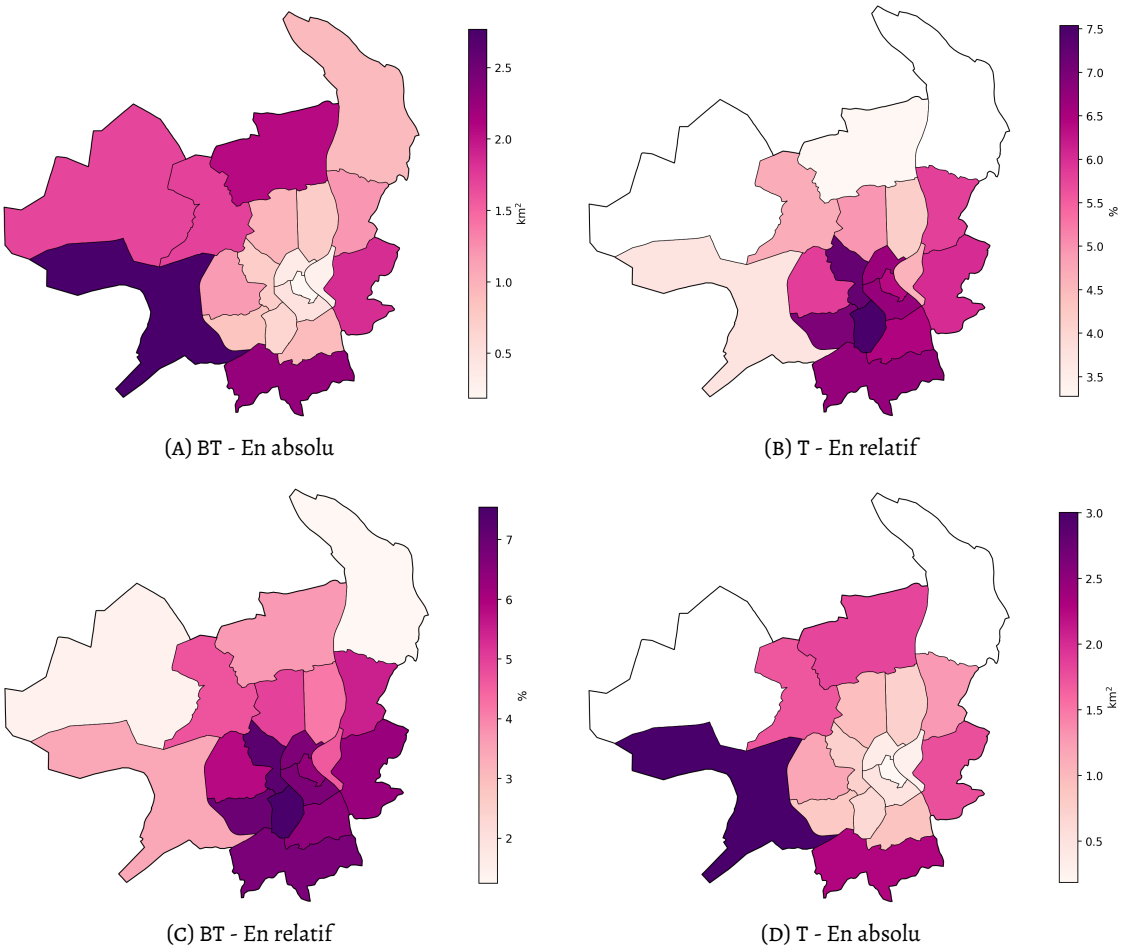


FIGURE 4.44 – Surface recouverte par les bâtiments dans les scénario BT et T en différence par rapport au scénario Base.

Les nouveaux investissements en bâtiments sont assez simples dans les deux cas étudiés comme cela est visible sur la figure 4.44. Ils se répartissent entre les *Bâtiments de banlieue proche* et les *Larges bâtiments d'activité*. Ces investssements ne sont pas liés à l'un ou l'autre des scénarios puisque les deux cas de concentration autour des axes de transport utilisent les mêmes archétypes dans les zones *valorisées* que ceux qui étaient présents dans le scénario de référence. Dans le scénario T, il y a moins de surface *valorisée* et le modèle conserve donc une portion plus large des archétypes du scénario Base (ceux striés sur les graphiques), conduisant à une différence d'environ 2.627 km² en 2050 (21.792 contre 19.165) entre les deux totaux de modifications des scénario BT et T par rapport à la situation de référence.

Quand on regarde plus spécifiquement la distribution géographique des modifications sur l'ensemble de la période (voir figure 4.45), on constate à nouveau que les zones périphériques voient des modifications plus importantes, en tout cas en valeur absolue (voir figures 4.45a et 4.45d). La situation est bien différente quand on étudie les cartes de changements d'investissements relatifs aux aires des zones (voir figures 4.45c et 4.45b) : ce sont, cette fois-ci, les zones centrales et sud de la métropole (BDX01, BDX02, BDX03, BDX04, BDX09, BDX10, BDX11, et BDX19) qui sont les plus touchées. La différence reste faible mais significative, de l'ordre de 4 % de superficie. Enfin, à nouveau, les zones BDX14 et BDX17 voient des modifications beaucoup plus faibles en absolu comme en relatif dans le scénario T que dans le scénario BT. On retrouve là le même phénomène que vu précédemment sur les changements d'archétypes (voir figures 4.39 p. 285) : ces deux zones



(A) BT - En absolu

(B) T - En relatif

(C) BT - En relatif

(D) T - En absolu

FIGURE 4.45 – Distribution géographique des modifications des archétypes de bâtiments dans les scénarios BT (*gauche*) et T (*droite*), en différence par rapport au scénario `Base`, en absolu (*haut*) et en relatif (*bas*).

sont les seules qui ne présentent aucun terrain proche des axes de tramway et donc le modèle n'a pas de raison de faire des modifications significatives par rapport au scénario de référence dans le scénario T.

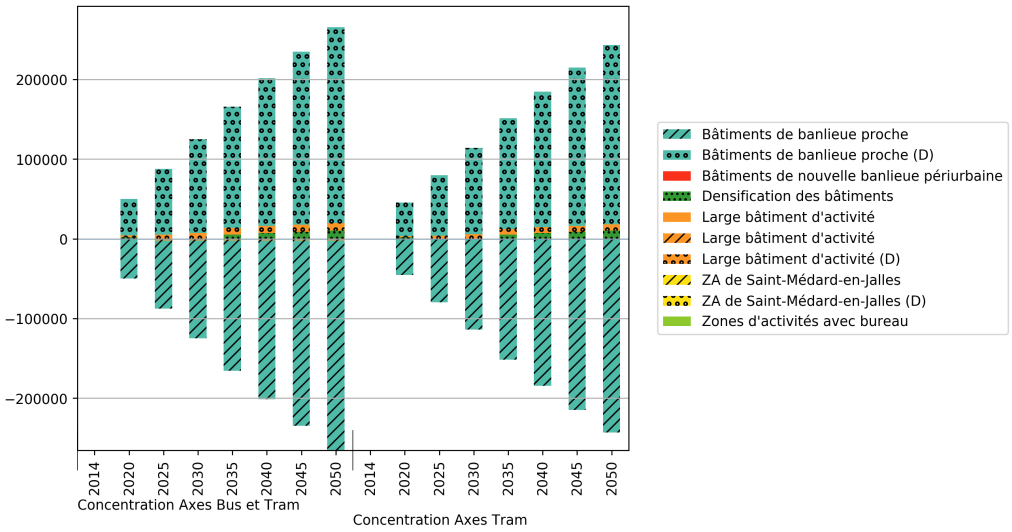


FIGURE 4.46 – Évolution de la répartition de la population entre les différentes formes de logements des scénario BT et T en différence par rapport au scénario de référence Base.

L'évolution de la population est imposée par la demande exogène, ce qui explique l'équilibre des valeurs non investies (négatives) et investies (positives) de la figure 4.46. À nouveau, la situation est très similaire entre les deux scénarios de densification et celui de référence avec le remplacement d'une bonne partie de l'archétype *Bâtiments de banlieue proche*, principalement dédié aux logements, par le même archétype mais concentré dans les zones accessibles par les transports en commun. On peut noter qu'une partie très faible de la demande (environ 10 000 habitants) est fournie par la *densification des bâtiments*, procédé qui consiste à remplacer des locaux d'activités dans les zones mixtes par des logements en supposant que le télétravail soit plus largement permis par les entreprises. Ce sont les zones centrales, BDX01, BDX02, BDX03 et BDX04, qui utilisent cette possibilité : les économies réalisées par les changements réalisés sur les zones centrales notamment sur les bâtiments permettent d'envisager ce genre d'effet.

Concernant les emplois, l'abandon progressif du recours aux emplois extérieurs à la métropole (plus aucun dans les deux scénarios de densification à partir de 2035) est remarquable. Il est compensé par une augmentation de la proportion d'emplois provenant de l'archétype *Large bâtiment d'activité* à proximité des axes de transport.

TIMES-URBAN n'a pas recours aux échanges d'emplois à l'intérieur du territoire de la même façon dans ces scénarios de densification autour des axes de transport que dans le scénario Base : ceux-ci sont mis à contribution de façon plus importante jusqu'en 2035 dans les scénario BT et T, puis sont moins utilisés les années suivantes. Les zones concernées dans l'*envoi* sont sensiblement les mêmes avec un renforcement du rôle de BDX07 et de BDX08 et un amoindrissement du rôle des zones BDX10 et BDX11 dans l'« exportation » d'emplois. En ce qui concerne les zones *réceptrices* d'emplois, les zones BDX09, BDX10, BDX11, BDX15 et BDX18 font un usage plus important des échanges pour fournir des emplois à leurs habitants. On peut noter le cas particulier des zones BDX10 et BDX11 qui deviennent plutôt

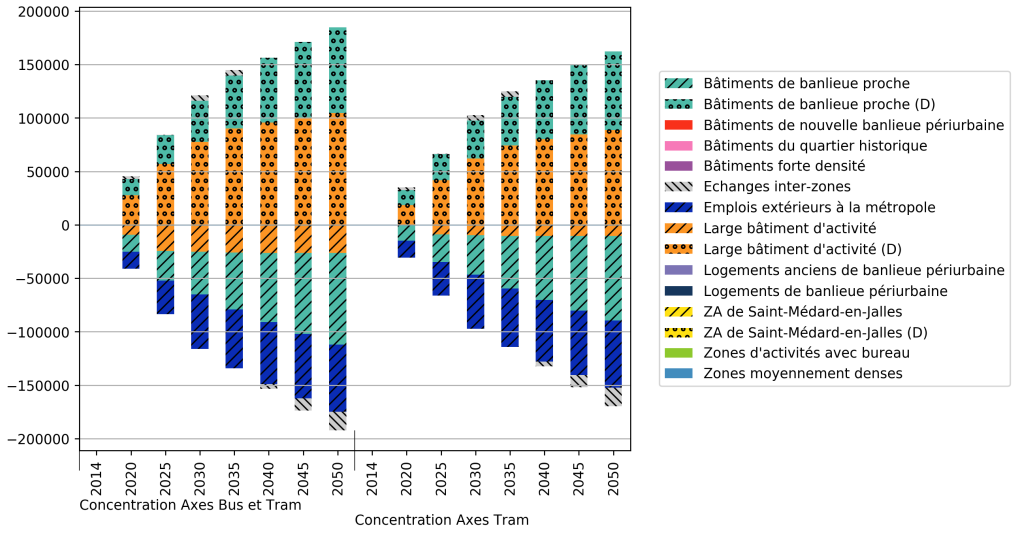


FIGURE 4.47 – Investissements et différences dans l'évolution des bâtiments des scénarios BT et T par rapport au scénario Base (en nombre d'emplois).

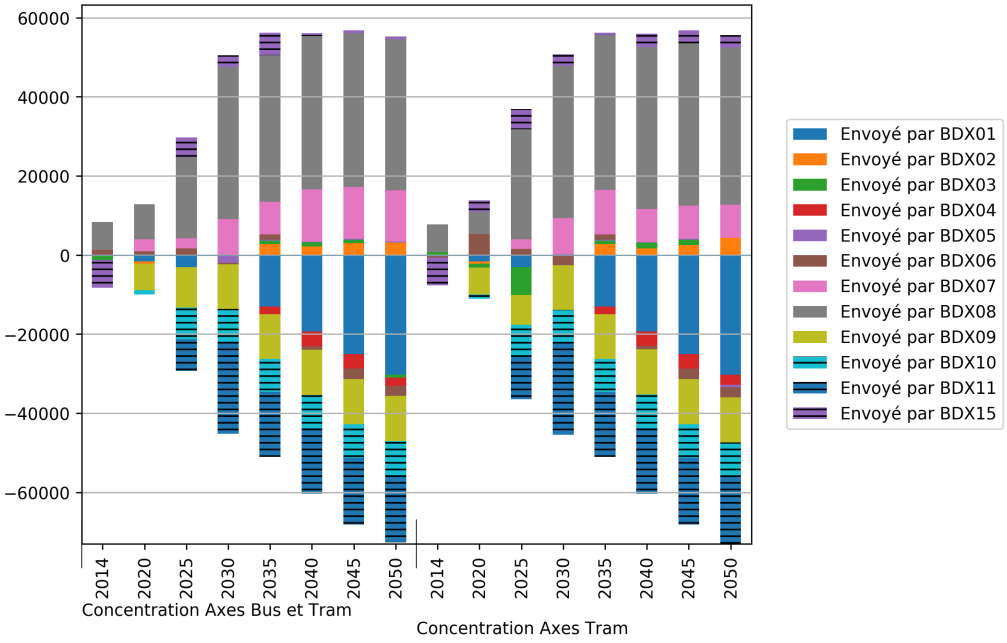
importatrices d'emplois, c'est-à-dire dont une partie des habitants se déplacent pour aller sur leur lieu d'activité, alors qu'elles étaient *exportatrices* dans le scénario de référence. Les différences entre les scénario BT et T sont mineures.

Premières conclusions

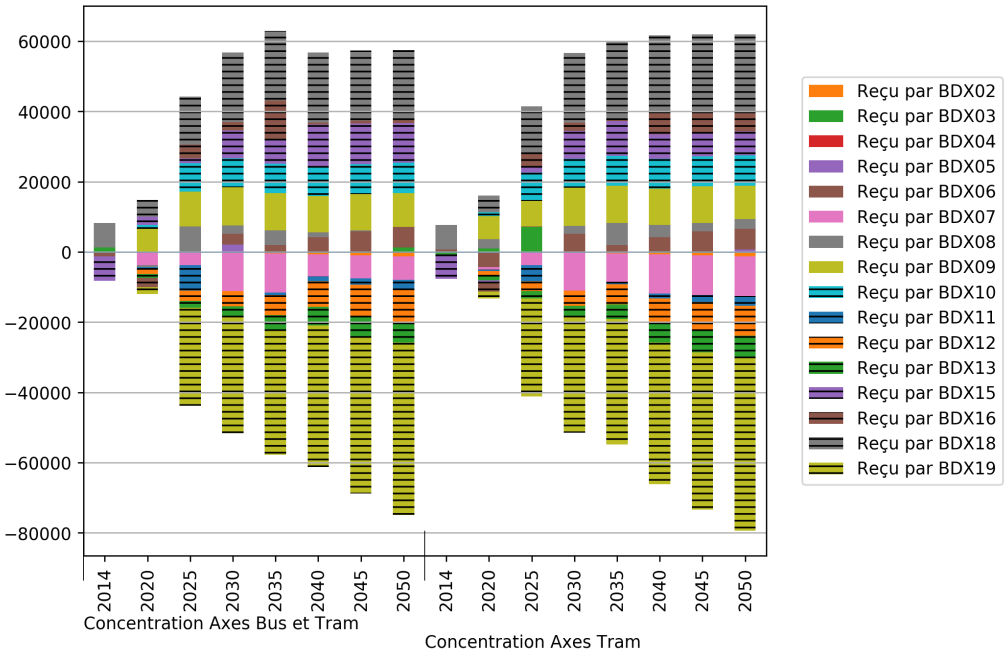
L'ajout des contraintes créant une priorité pour des zones proches des axes de transport a bien eu des effets importants sur les investissements faits dans la trajectoire calculée par TIMES-URBAN. Nous avons ainsi pu constater des changements significatifs dans les archétypes employés, en-dehors de la forme *Zone d'activités 2* qui reste largement déployée sur le territoire. Une autre forme de *Ville dense* est ainsi préférée à celle qui était présente dans le scénario de référence. Les investissements sont progressifs et ils atteignent un palier relatif à partir de 2030.

Si l'on compare le scénario BT avec celui T, on a donc remarqué que dans cette dernière configuration, les changements d'investissement et d'usage sont moins importants. Ce fait s'explique par la faible superficie concernée par l'accessibilité au tramway et donc par le peu de modification des contraintes que subit TIMES-URBAN dans le scénario T.

On note aussi que la métropole s'appuie moins sur les emplois extérieurs et effectue une proportion moins grande d'échanges inter-zones.



(A) Envois d'emplois



(B) Réceptions d'emplois

FIGURE 4.48 – Échanges d'emplois au sein de la métropole dans le scénario Base en valeurs absolues (en nombre d'emplois).

IV.4.b. En sortie de URBAN-SPATIALIZER

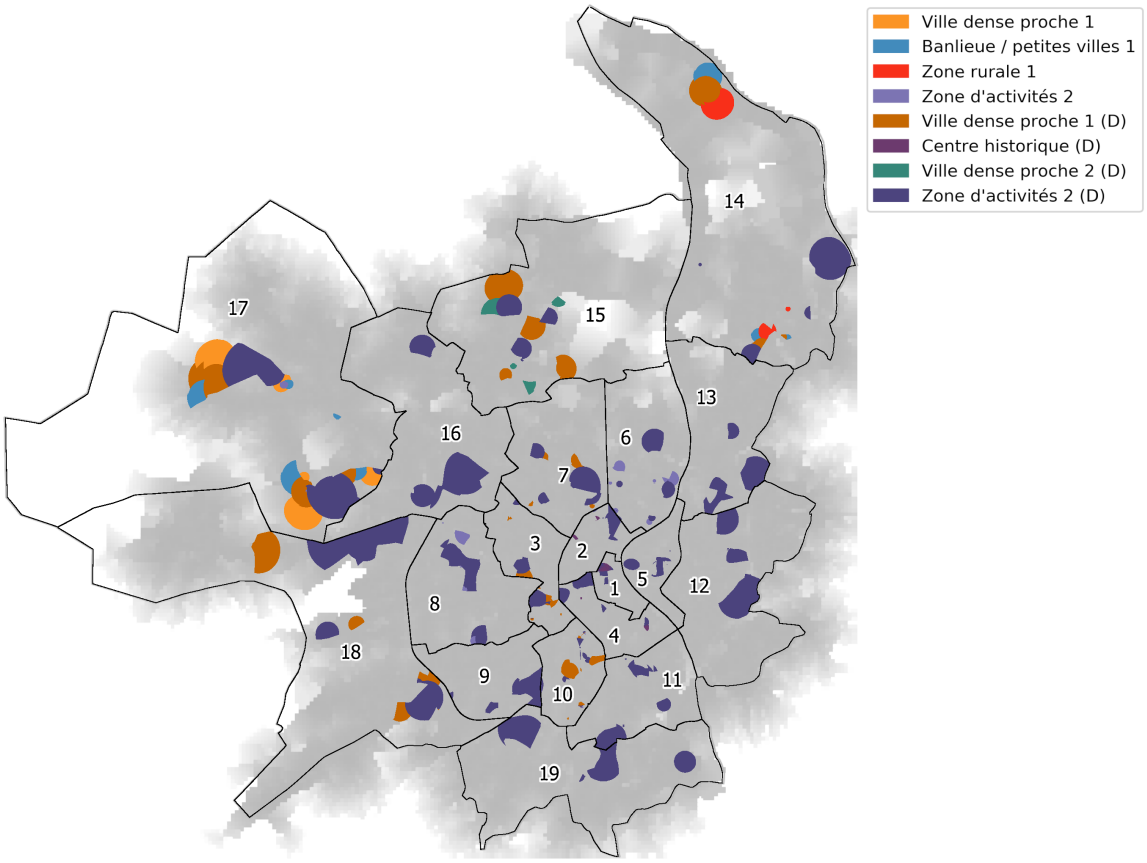
Occupation du sol

Les figures 4.49a et 4.49b présentent les changements entre 2014 et 2050 dans la répartition des archétypes dans la métropole dans les scénario BT et T. On a ajouté les cartes de contraintes liées aux axes de transport en filigrane en arrière-plan.

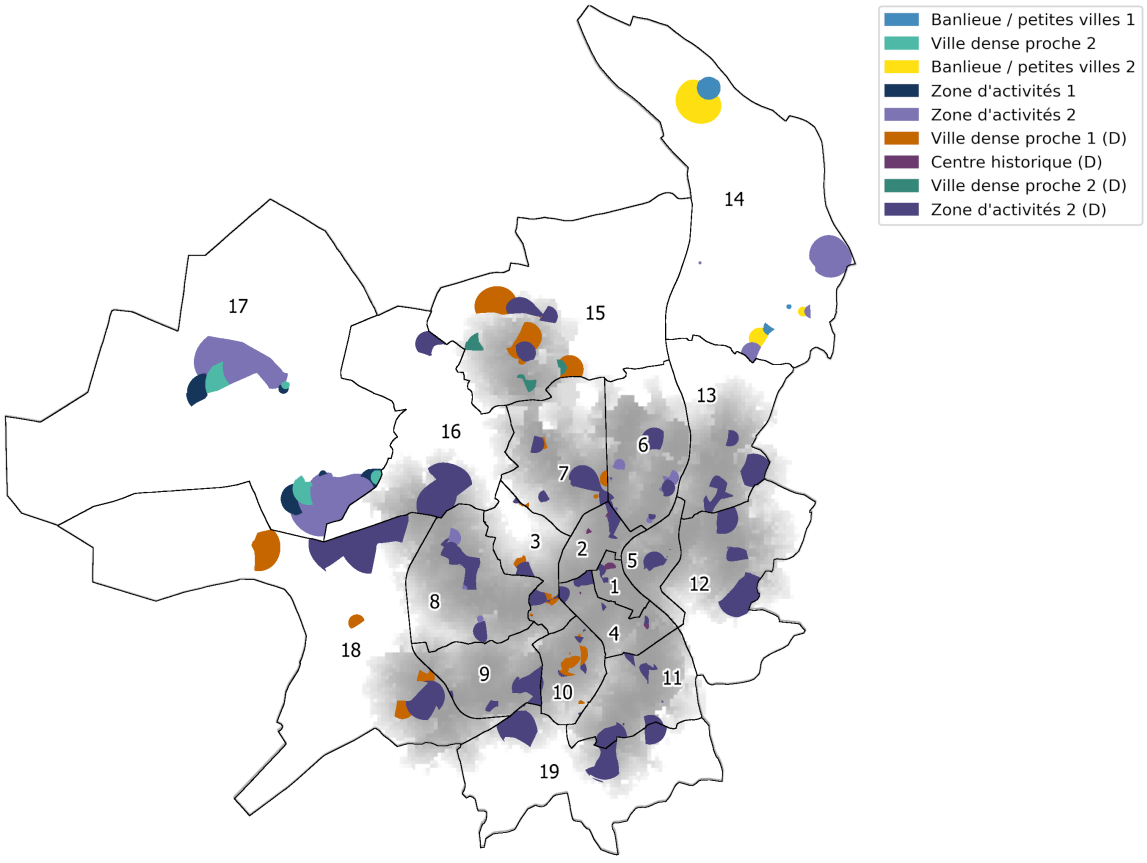
La première impression qui s'en dégage est qu'il existe une solution trouvée par URBAN-SPATIALIZER qui respecte les contraintes supplémentaires liées à la distribution géographique et à insérer les modifications à proximité des axes de transport quand cela avait été imposé par TIMES-URBAN. Néanmoins, dans le scénario T où les surfaces accessibles par les arrêts de tramway sont bien plus faibles, la zone BDX18 (à l'ouest de la métropole) voit une bonne partie de ses investissements réalisés hors des zones d'intérêts : la trajectoire calculée par TIMES-URBAN n'est pas compatible avec les contraintes spatiales du territoire et ne peut être appliquée aux seules surfaces *autorisées*.

En outre, mis à part les archétypes de *Zones d'activités 2*, les développements dans les zones BDX14 et BDX17 sont très distincts dans les deux scénarios avec des empreintes géographiques fortement similaires. Les figures 4.50 en présentent des aperçus plus rapprochés ainsi que les cartes correspondantes dans deux paramètres importants pour l'occupation des sols, la couverture végétale et le coefficient d'emprise au sol. Les surfaces favorables aux changements d'occupation des sols sont similaires dans ces deux zones mais les formes sélectionnés sont très différents selon la situation (*Banlieue / petites villes 1*, *Ville dense proche 1*, *Zone d'activités 2* dans le scénario BT, *Zone d'activités 1*, *Ville dense proche 2*, *Zone d'activités 2* dans le scénario T). Quand on regarde l'impact sur l'artificialisation des sols, on constate dans les figures 4.50e et 4.50f que le scénario BT a des emprises au sol plus importantes que dans les deux autres scénarios. Les trois scénarios donnent lieu à une baisse assez importante de la végétation, en particulier au nord-ouest de la zone considérée (voir cartes 4.50g, 4.50h et 4.50i). Toutefois, le scénario Base présentait également des augmentations légères à certains endroits de la couverture végétale (voir figure 4.50g) et à une baisse de l'emprise (voir figure 4.50d), ce qui n'arrive pas dans les deux autres scénarios.

La figure 4.51 (p. 297) illustre plus précisément les résultats sur une portion de la zone BDX15. À l'inverse des deux zones BDX14 et BDX17 précédemment citées, BDX15 voit dans les deux situations BT et T les mêmes archétypes (*Villes denses proches 1* et *2* ainsi que *Zone d'activités 2*) mais dans des configurations spatiales différentes : le scénario T ne prenant en compte que les axes de tramway, les changements sont plus concentrés dans le sud et l'ouest de la zone alors qu'ils se déploient légèrement plus loin dans le scénario BT. Ce dernier est marqué par une dispersion des investissements en un nombre élevé de surfaces plus réduites là où les modifications sont faites grâce à quelques surfaces larges dans le scénario T. On peut noter enfin que les investissements dans les formes *Zone d'activités 2* et *Ville dense proche 2* sont finalement assez similaires dans les scénario Base et BT. Contrairement au cas précédent, les modifications de couverture des sols sont relativement similaires dans les trois cas avec une intensité plus forte d'artificialisation et d'imperméabilisation dans les deux scénarios de densification par

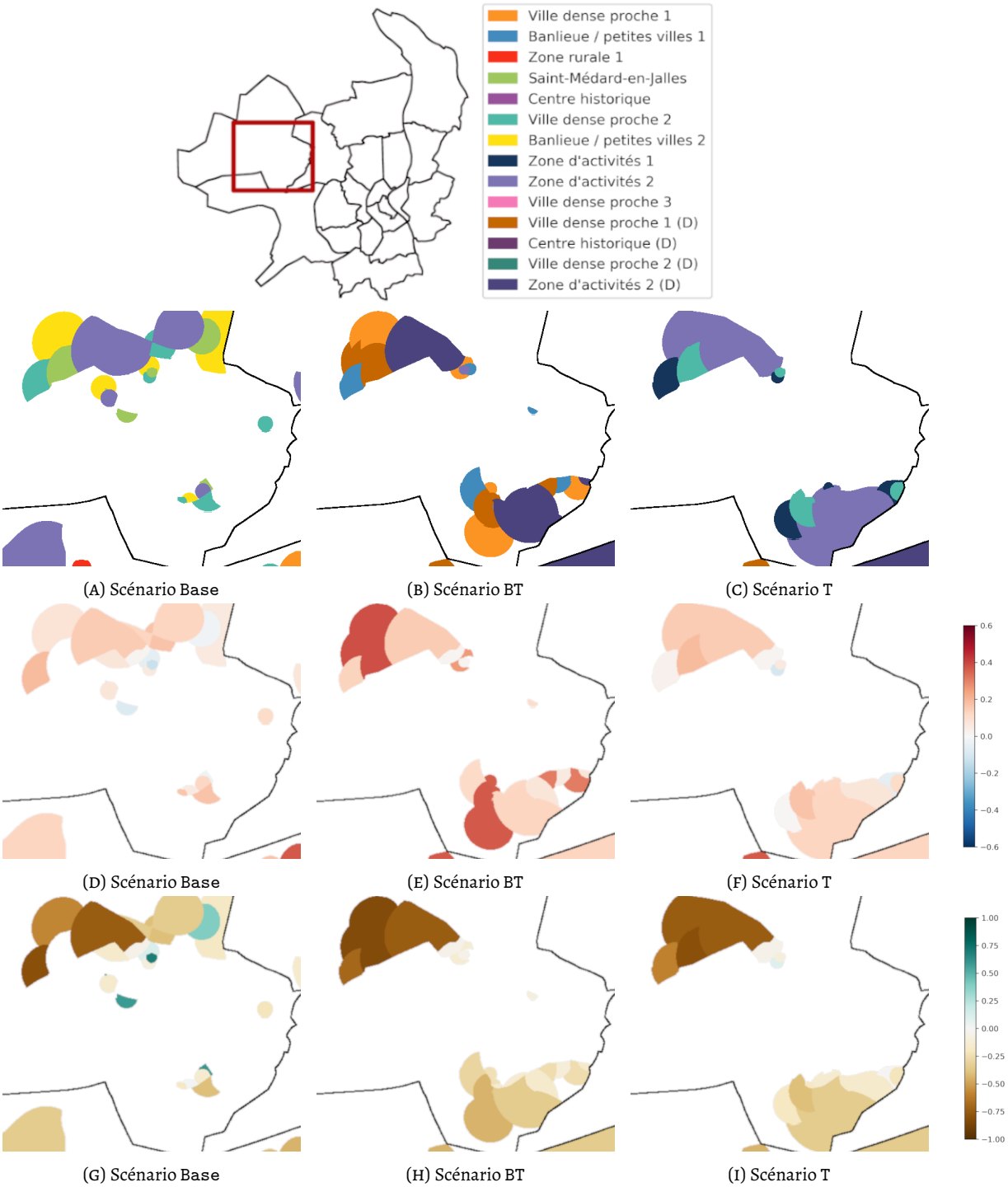


(A) Scénario BT



(B) Scénario T

FIGURE 4.49 – Différences de localisation des archétypes de *formes urbaines* entre 2014 et 2050 dans les scénario BT et T.

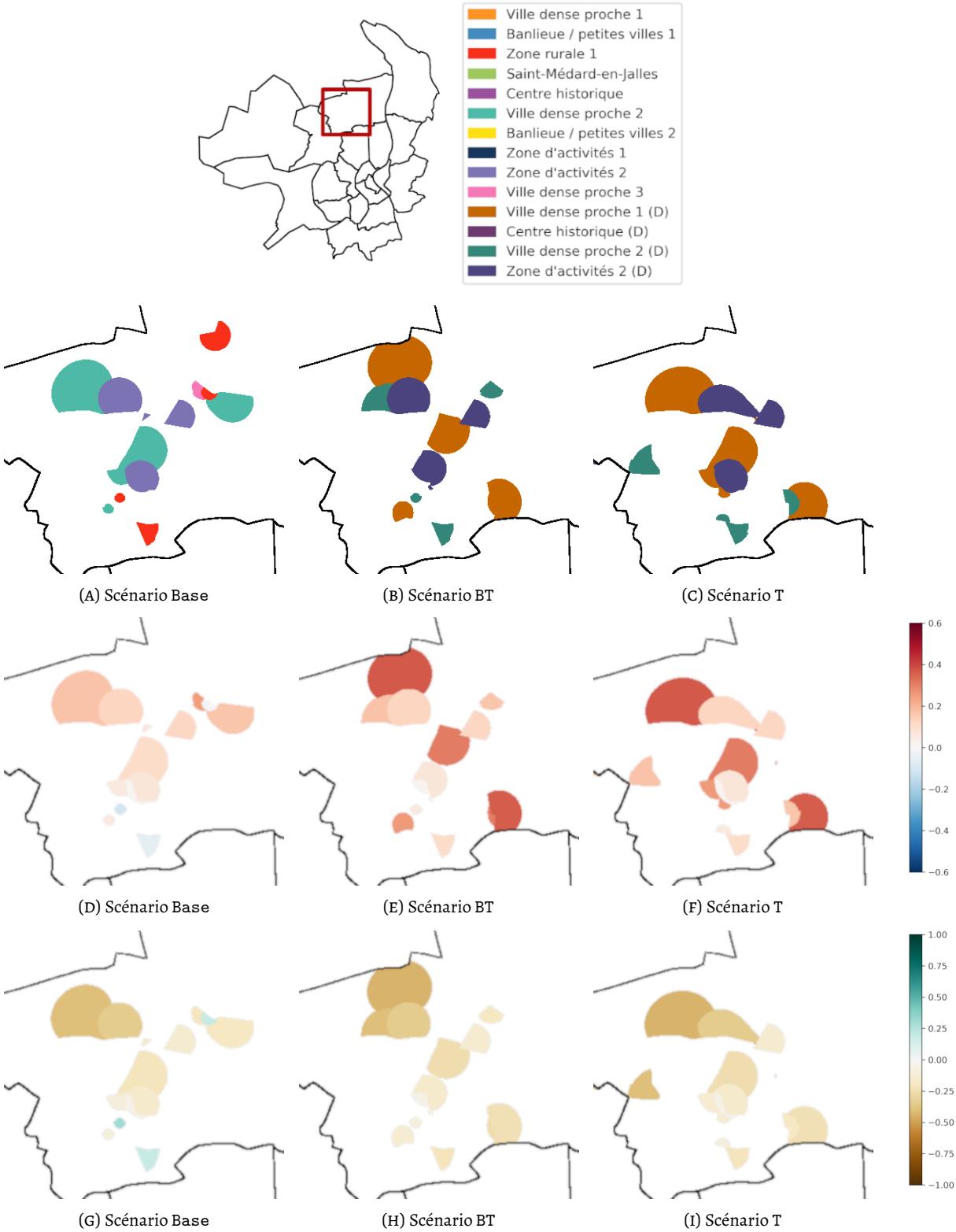


(A) Scénario Base (B) Scénario BT (C) Scénario T

(D) Scénario Base (E) Scénario BT (F) Scénario T

(G) Scénario Base (H) Scénario BT (I) Scénario T

FIGURE 4.50 – Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *formes urbaines* (*haut*), le coefficient d'emprise au sol (*millieu*) et la proportion d'espaces naturels (*bas*) sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans le scénario de référence (*gauche*), dans le scénario BT (*milieu*) et dans le scénario T (*droite*).



(A) Scénario Base (B) Scénario BT (C) Scénario T

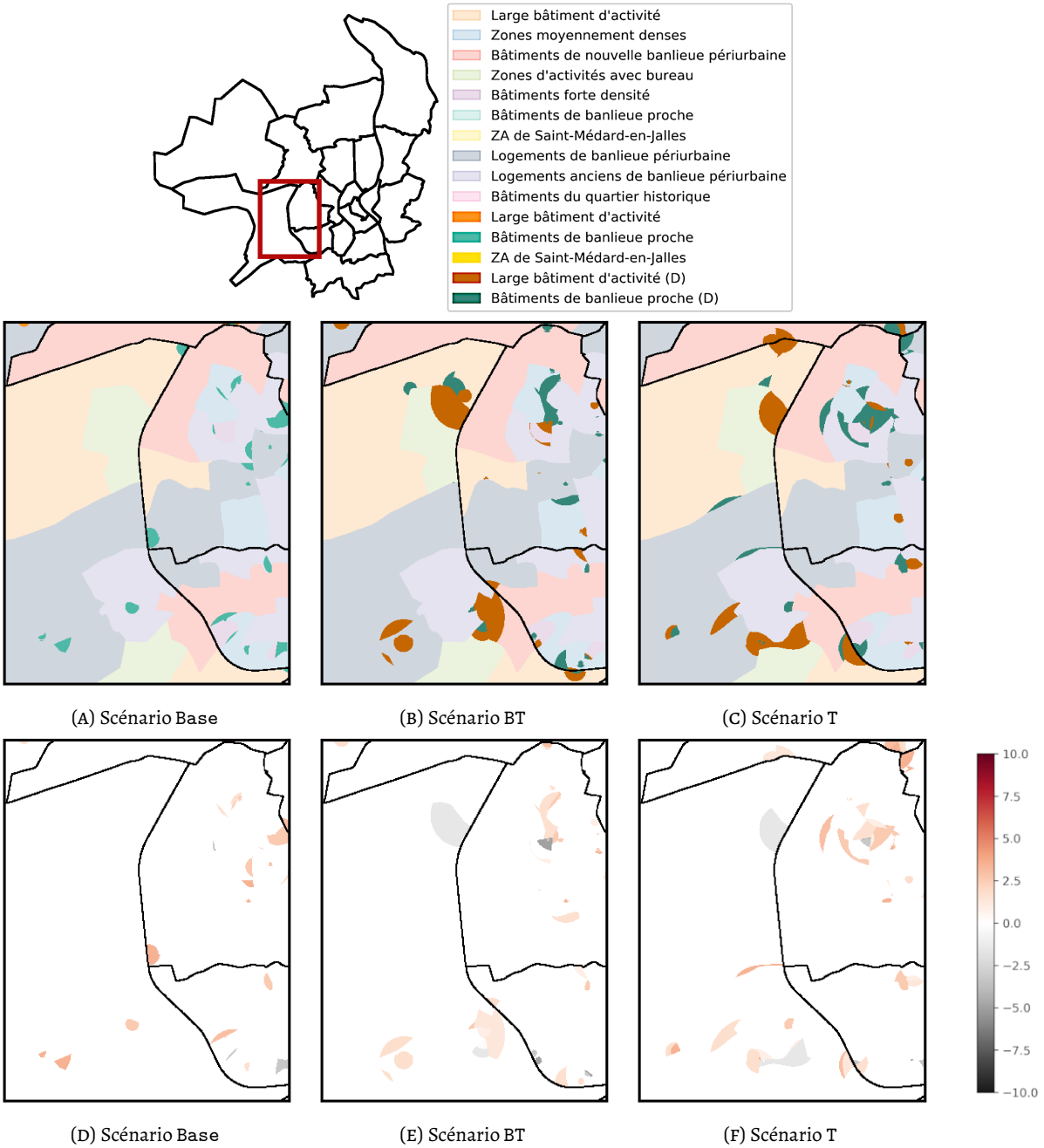
(D) Scénario Base (E) Scénario BT (F) Scénario T

(G) Scénario Base (H) Scénario BT (I) Scénario T

FIGURE 4.51 – Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *formes urbaines* (*haut*), le coefficient d'emprise au sol (*millieu*) et la proportion d'espaces naturels (*bas*) sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans le scénario de référence (*gauche*), dans le scénario BT (*milieu*) et dans le scénario T (*droite*).

rapport au scénario Base. Par contre, on retrouve le phénomène où les espaces naturels augmentaient à quelques endroits ponctuels dans la zone BDX17 dans le scénario Base, ce qui n'advient pas dans les deux autres scénarios.

Bâtiments



(A) Scénario Base (B) Scénario BT (C) Scénario T

(D) Scénario Base (E) Scénario BT (F) Scénario T

FIGURE 4.52 – Zoom sur les différences de localisation d'archétypes de *bâtiments* (*haut*) et la hauteur moyenne (*milieu*) sur une zone de la métropole entre 2014 et 2050 dans le scénario de référence (*gauche*), dans le scénario BT (*milieu*) et dans le scénario T (*droite*).

La figure 4.52 illustre la distribution spatiale des bâtiments dans les scénario BT et T par rapport au scénario de référence. La première constatation est bien sûr la différence d'ordre des surfaces concernées dans les trois situations avec une ampleur bien plus importante dans les deux scénarios de densification (voir figures 4.52b et 4.52c). On remarque également le déploiement sur de larges superficies de *Larges bâtiments d'activités*, soit en combinaison avec l'archétype

Bâtiments de banlieue proche, soit de façon isolée : les investissements sont alors concentrés dans de larges projets correspondant pour la plupart à des zones non exploitées dans le scénario de référence.

La création de ces locaux principalement consacrés aux usages professionnels (avec 91,6 % de la surface environ dédiée aux entreprises) se fait en partie dans des zones couvertes de bureaux, en particulier au nord et au sud-est des figures 4.52b et 4.52c, c'est-à-dire sans grand changement de constructions mais plutôt avec un reconditionnement ou une réorganisation des bâtiments. Au sud de la zone affichée toutefois, ce sont plutôt des archétypes de banlieue qui sont remplacés par ces nouveaux investissements, impliquant un travail plus conséquent sur les structures selon les types d'emploi.

IV.5. Le récit prospectif de la ville future

Face aux manques de fonds des communes et plus généralement de la puissance publique, les investissements en infrastructures de transport sont de plus en plus difficiles à rassembler. Pour autant, la métropole de Bordeaux ne cesse de croître, approchant du million d'habitants en 2030. Cette dynamique démographique n'est pas la seule à changer les façons d'aménager : la crise environnementale pousse les citoyens à privilégier de plus en plus les modes doux et à emprunter les transports en commun de façon plus régulière. La saturation de la rocade et des principaux axes routiers a peut-être aussi favorisé ce changement d'habitude. Au vu des demandes qui tendent un peu plus le marché de l'immobilier sur tout le territoire de la métropole, il a semblé alors opportun de concentrer les investissements autour des axes existants et de tenter de densifier ces zones. La priorité a donc été donnée aux projets qui se concentrent dans ces lieux tout en laissant une certaine latitude aux chantiers d'aménagement plus éloignés. Cette politique de densification a fonctionné et a permis d'utiliser plus efficacement les terrains à proximité des axes de transport. Des étages ont été ajoutés à certains bâtiments existants, les logements vacants ont été remis sur le marché, les habitations secondaires et les locations de courte durée ont été lourdement taxées pour favoriser l'emménagement d'habitants, certains appartements ont été redécoupés pour mieux correspondre aux attentes de la population de logements plus petits et moins chers.

Néanmoins, toutes ces manœuvres de densification ont eu un coût en espaces naturels, déjà peu présents dans certaines zones de la métropole. Il a fallu trouver des solutions alternatives, telles que la végétalisation des toits et la mise-en-place d'une véritable forêt urbaine au-dessus des pistes cyclables et trottoirs, occasionnant des situations dangereuses en automne et surtout un surcoût d'entretien pour la métropole et les communes qui ont cherché, parfois avec succès, le soutien de groupements locaux de jardiniers ou de passionnés.

Les zones extérieures de la métropole sont finalement celles qu'il a été le plus facile de transformer puisqu'elles présentent les superficies les plus importantes et donc les potentiels les plus grands en termes de changement. De plus, la marge de manœuvre y est plus large au vu de la faible pression imposée sur les sols, à défaut d'avoir une protection stricte des forêts ou des espaces naturels. Cependant, les incitations financières à la concentration autour des axes existants ont contribué à créer une rupture entre les communes du pourtour et les villes à l'intérieur de la rocade de Bordeaux, en particulier du côté occidental de la rive gauche. Des investissements ont été attendus par les populations des périphéries qui ont finalement préféré créer des écosystèmes économiques locaux pour moins dépendre des emplois du centre de la métropole.

V. Un impact flagrant sur la température : résultats de URBAN-TEMPÊST

L'obtention de diverses cartes de répartition des archétypes de formes urbaines et de bâtiments a permis l'examen des modifications du territoire à l'horizon 2050 dans chacun des différents scénarios étudiés précédemment. L'application de URBAN-TEMPÊST sur ces résultats fournit enfin une analyse supplémentaire sur la répartition locale de la température des conséquences que peuvent avoir de telles modifications.

V.1. La cohérence générale des résultats de URBAN-TEMPÊST

Il est possible de comparer dans un premier temps les résultats de URBAN-TEMPÊST aux données de 2018 qui ont été initialement utilisées pour l'entrainement du modèle (voir figure 4.53).

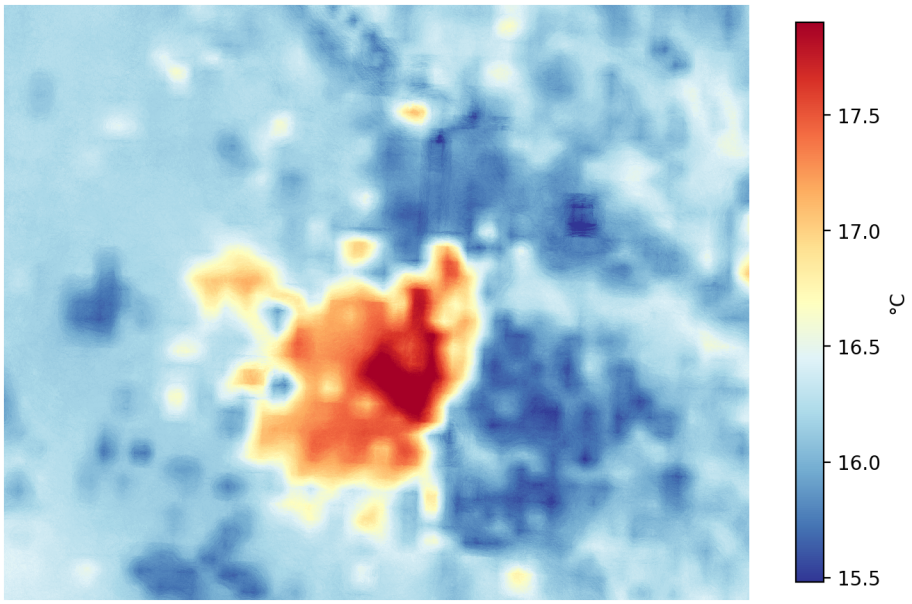
Les résultats obtenus (visibles sur la figure 4.55 pour le scénario de référence) fournissent des cartes cohérentes avec l'organisation spatiale des données fournies à URBAN-TEMPÊST : on y discerne la métropole dont les contours sont, conformément à ce qui était attendu [23], légèrement marqués par rapport au reste du territoire (voir figure 4.54a). À première vue, on retrouve également un centre de la métropole marqué par une température plus élevée que les parties plus périphériques et l'extérieur de Bordeaux. La température augmente sur toutes les zones modifiées par rapport à l'année de référence. Le résultat attendu est confirmé : la densification conduit à une hausse de la température partout où elle a lieu et conduit à des hausses plus importantes au centre des quartiers densifiés.

Les résultats sont très similaires dans le scénario DP où la population est doublée. On voit une très légère hausse de l'intensité autour du territoire de Les résultats sont très similaires dans le scénario DP où la population est doublée. On voit une très légère hausse de l'intensité autour du territoire de Saint-Médard-en-Jalles.

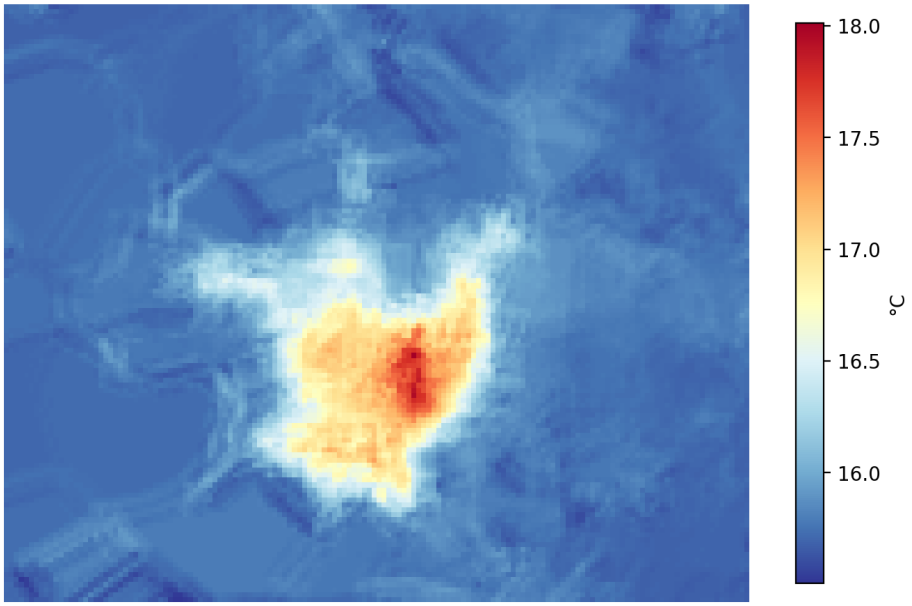
V.2. Des scénarios de densification peu efficaces sur la température

Les résultats des scénarios de densification autour des axes de transport (BT et T) ont conduit à un déploiement de formes urbaines (section IV.4.b, p. 294) avec dans les deux cas d'importantes modifications des territoires de Saint-Médard-en-Jalles et de l'ouest de Mérignac. L'effet de ces changements est visible sur la température en 2050 par rapport à l'année de référence (voir figure 4.56) : y apparaîssent particulièrement trois pôles d'augmentation de la température (de l'ordre du degré) dans la portion nord-ouest de la métropole. Ces pôles correspondent aux trois territoires de Blanquefort et de Saint-Médard-en-Jalles qui voient les investissements les plus importants dans les scénarios BT et T. Le

23. Voir notamment la section III.5 du chapitre 3, p. 224, sur le travail réalisé pour limiter les effets de bords.

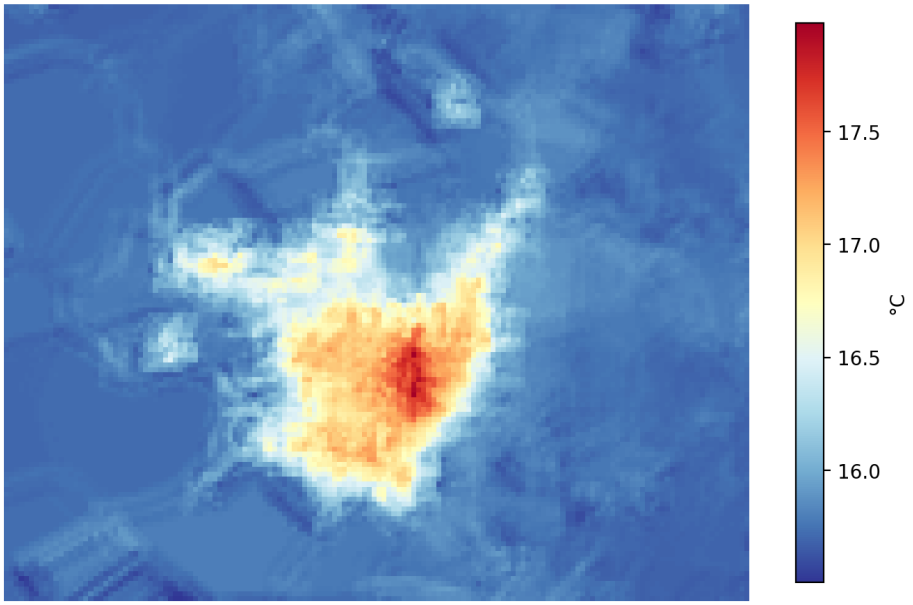


(A) Données Météo France



(B) Estimations de URBAN-TEMPÊST sur l'année de référence

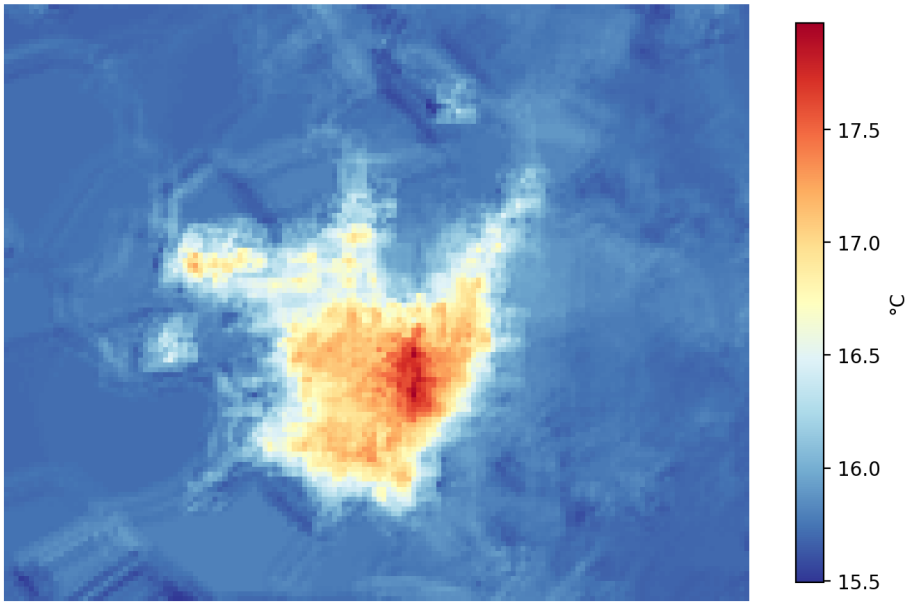
FIGURE 4.53 – Comparaison entre les données de Météo France utilisées pour l'entrainement (*haut*) et le résultats de URBAN-TEMPÊST sur l'année de référence (*bas*). On constate un certain nombre de différences notamment liées à l'utilisation de 2018 comme référence pour la température et de 2014 comme année de référence de TIMES-URBAN, à l'uniformisation de l'extérieur de la métropole et aux approximations inhérentes au fonctionnement de URBAN-TEMPÊST. Dans l'ensemble pourtant, le paysage est similaire avec des températures globalement plus élevées d'après Météo France que selon URBAN-TEMPÊST. La température du cœur de la métropole est ainsi plus haute que le reste du territoire dans les deux figures et ce sur des surfaces similaires.



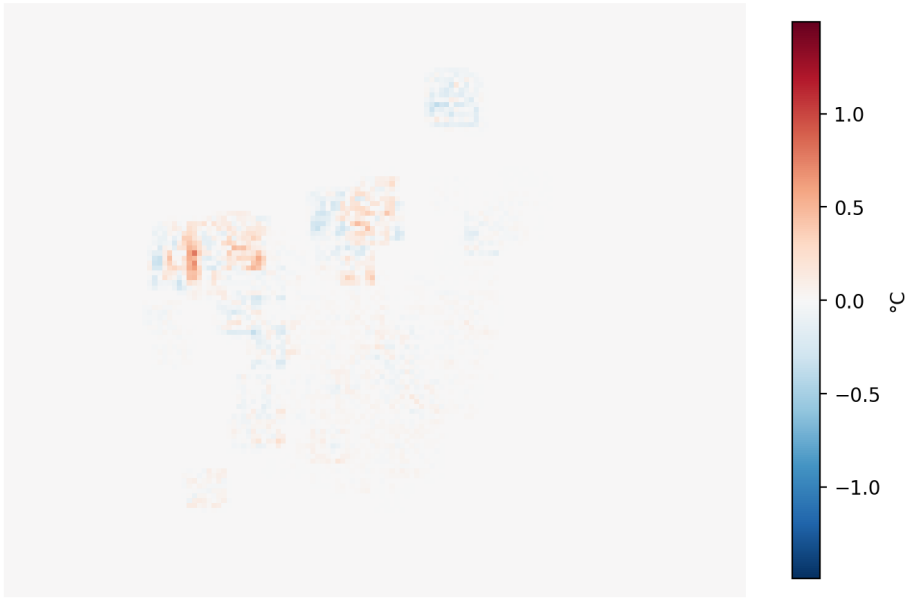
(A) Valeur absolue

(B) Valeur relative à 2014

FIGURE 4.54 – Cartes de résultats de l'application de URBAN-TEMPÊST sur la situation de Bordeaux Métropole dans le scénario de référence en 2050 en absolu (haut) et en relatif par rapport à 2014 (bas).

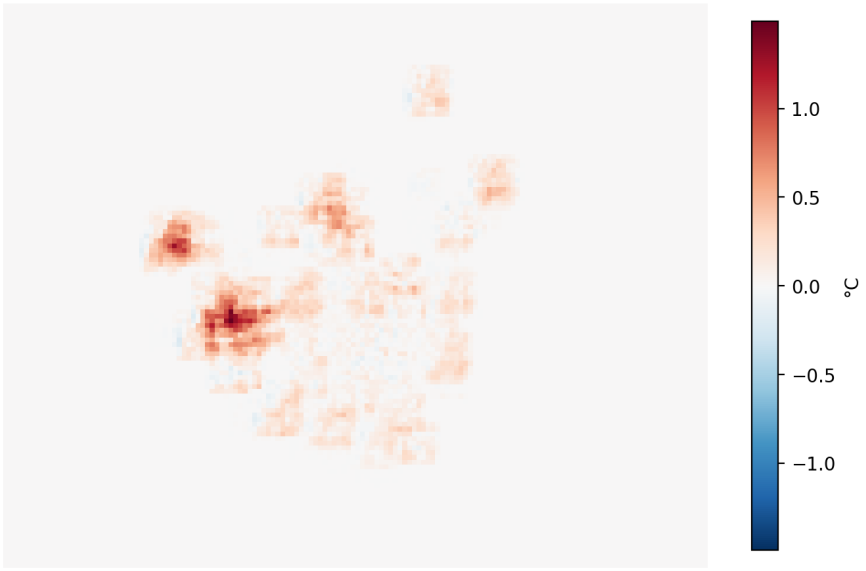


(A) Valeur absolue

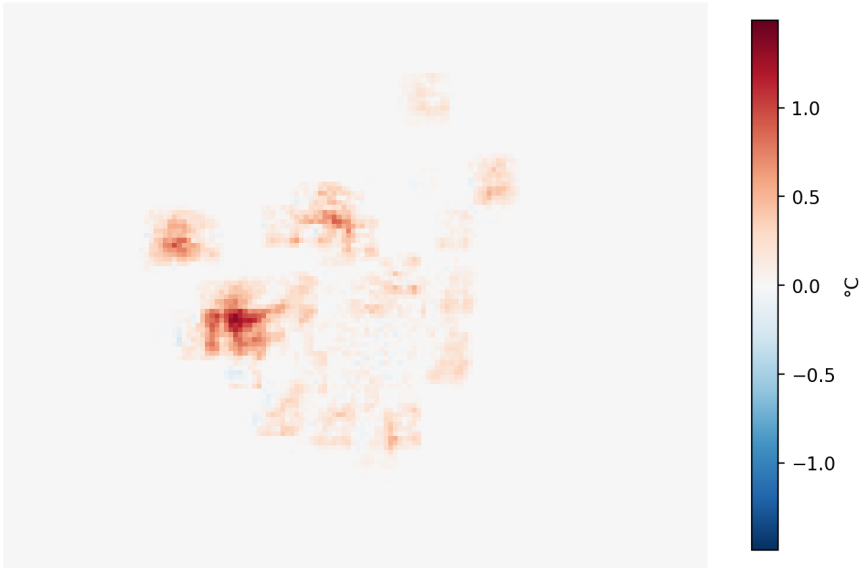


(B) Valeur relative au scénario Base

FIGURE 4.55 – Cartes de résultats de l'application de URBAN-TEMPÊST sur la situation de Bordeaux Métropole dans le scénario DP en 2050 en absolu (haut) et en relatif par rapport au scénario de référence (bas).



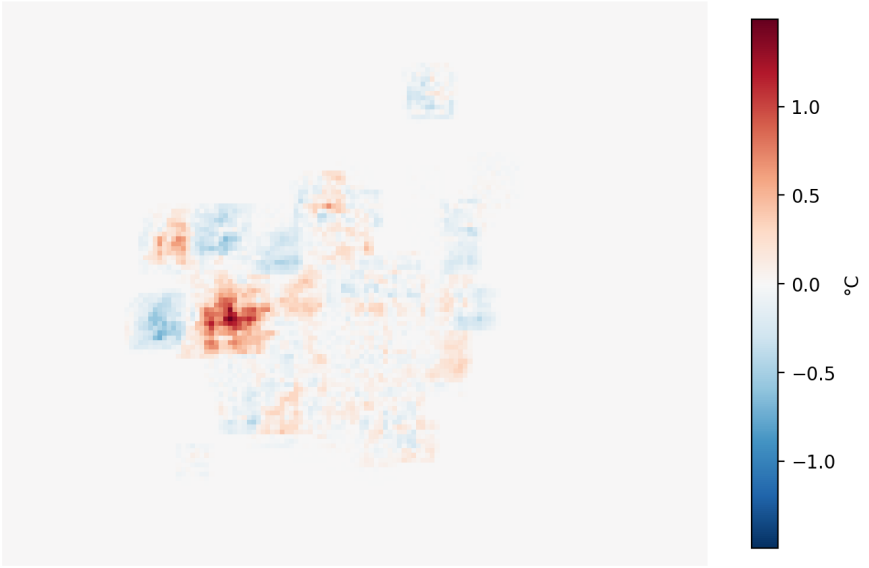
(A) Scénario BT par rapport à 2014



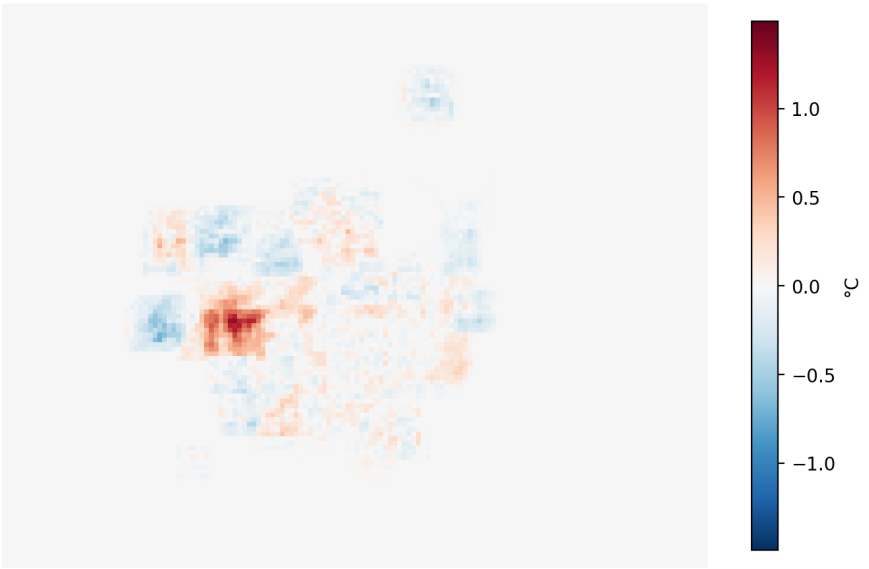
(B) Scénario T par rapport à 2014

FIGURE 4.56 – Cartes de différences de la température en 2050 dans les scénarios de densification autour des axes de transport par rapport à 2014.

reste est peu modifié, avec quelques zones très restreintes qui voient une baisse inférieures à 0,2°C.



(A) Scénario BT par rapport au scénario `Base`



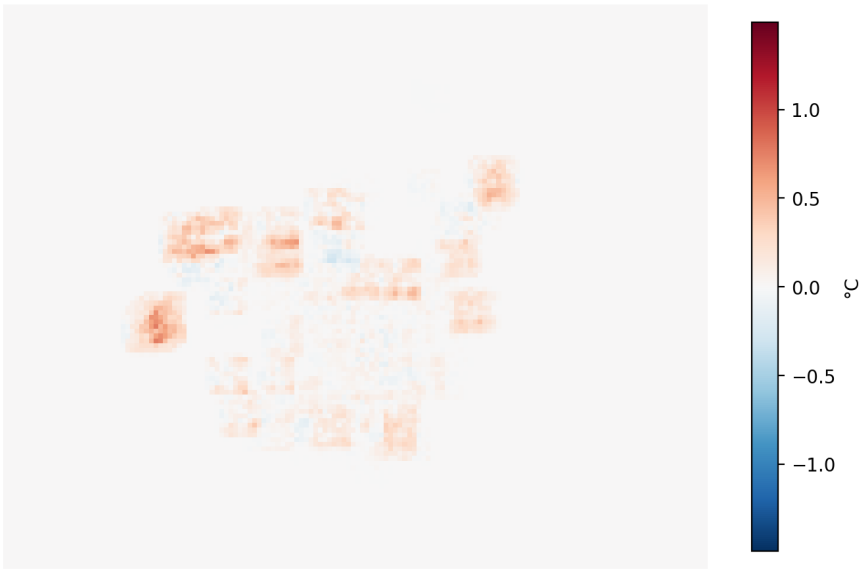
(B) Scénario T par rapport au scénario `Base`

FIGURE 4.57 – Cartes de différences de la température en 2050 dans les scénarios de densification autour des axes de transport par rapport au scénario de référence.

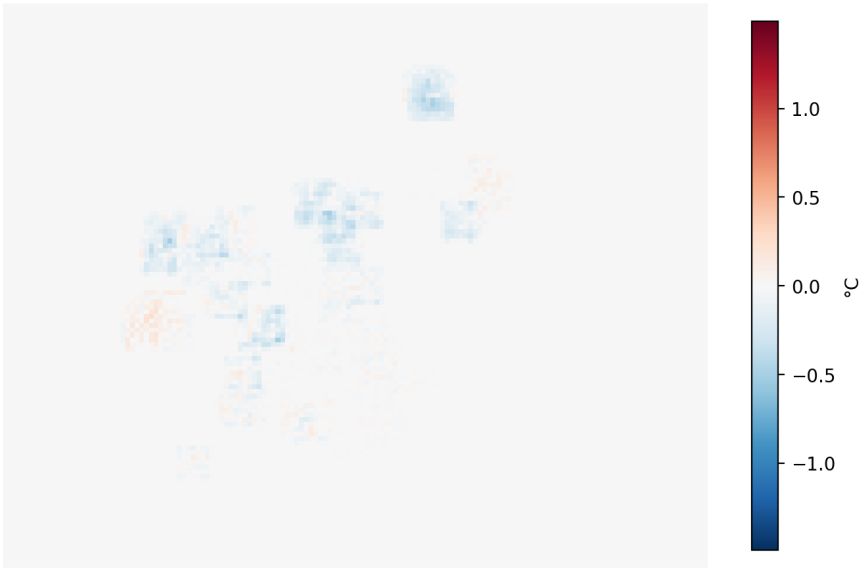
La comparaison avec le scénario de référence est plus contrastée (voir figure 4.57) : les portions de la métropole où a lieu l'augmentation de la température par rapport à 2014 sont également marquées par une hausse moyenne par rapport au scénario de référence, indiquant que les scénarios BT et T développent cette partie de la métropole dans les deux scénarios de densification bien plus que dans le scénario de référence. Par contre, de larges superficies du territoire voient une baisse légère ($\leq 0{,}5$°C) de la température : la politique de densification conduit à intensifier les îlots de chaleur urbains dans les zones densifiées mais diminue l'augmentation dans les zones alentours. Une telle situation peut renforcer les inégalités sociales ou environnementales au sens où les zones les plus densifiées sont celles qui sont le plus impactées par le potentiel d'îlots de chaleur urbains

(ICU). Des mesures spécifiques sont nécessaires pour prévenir les phénomènes d'ICU et en diminuer l'intensité.

V.3. Un scénario de limite de l'artificialisation prometteur



(A) Scénario ZAN par rapport à 2014



(B) Scénario ZAN par rapport à Base

FIGURE 4.58 – Cartes de différences de la température en 2050 dans le scénario « *Zéro artificialisation nette* » par rapport à 2014 et au scénario de référence.

Le scénario « *Zéro artificialisation nette* » donne des hausses de température par rapport à l'année de référence mais celles-ci sont similaires à celles du scénario de référence (voir figure 4.58). Dans l'ensemble, les températures de 2050 de ce scénario sont même légèrement plus faibles ($-0{,}4$°C) et ce sur l'ensemble du territoire, à l'exception de quelques portions qui voient plutôt une hausse minime ($+0{,}25$°C). La politique de limitation de l'artificialisation a donc des effets notables sur la température ressentie. En outre, elle diminue les risques

d'inégalités territoriales face aux ICU par rapport aux scénarios BT et T présentés précédemment, les différences locales étant minimes.

VI. Des éléments communs aux différents scénarios

Quelles leçons pouvons-nous tirer des différents scénarios proposés ici ? Quels grands traits se dégagent-ils des cas étudiés et des réponses de TIMES-URBAN, de URBAN-SPATIALIZER et de URBAN-TEMPÊST ? Les moyens choisis pour répondre de façon optimale à la demande finale en respectant les contraintes suggèrent des pistes de réflexion pour l'aménagement urbain aujourd'hui face aux problèmes posés dans le premier chapitre [24].

VI.1. Des périphéries largement mises à contribution

Tous les scénarios profitent largement de la tension moins importante sur les terrains dans les larges communes périphériques, en particulier à l'ouest de la métropole, pour y effectuer des changements d'occupation des sols de façon importante [25].

Cette tendance est déjà visible aujourd'hui dans le phénomène de l'étalement urbain : les zones agricoles ou naturelles qui entourent les villes sont grignotées par l'urbanisation et la croissance des terrains artificialisés.

D'après LE NÉCHET (2015), la métropole de Bordeaux est en 2015 « *monocentrique compacte* », résultat obtenu par une comparaison de 110 *zones urbaines élargies* en Europe [LE NÉCHET (2015)]. Ce n'est pas l'avis de l'agence d'urbanisme publique de la communauté de communes qui compare la métropole à un « *archipel métropolitain, espace discontinu, hétérogène, fragmenté, polycentrique* » [A'URBA et LA CUB (2010)]. Il est difficile de trancher, l'A'urba ayant une connaissance plus fine de son territoire, notamment sur la distribution des différentes fonctions au sein de la métropole [26] tandis que l'approche de LE NÉCHET (2015) est plus complète et soutenue par une analyse quantitative et comparative.

Plutôt qu'en faveur de l'étalement urbain, les trajectoires de TIMES-URBAN peuvent être envisagées comme des visions de villes polycentriques plutôt qu'hyper-centralisées : la déconcentration de la population et de certaines activités économiques permet de diminuer la pression sur les transports en commun, sur les espaces naturels, sur les services publics tout en imposant des investissements majeurs

24. Voir chapitre 1, p. 5.

25. Ces choix peuvent être en partie expliqués par la création des dix-neuf zones de TIMES-URBAN mais la possibilité d'échanger des « emplois » entre zones laisse une grande flexibilité au modèle pour spécialiser certains territoires par des zones d'activités économiques, ce qui n'est pas ce qu'il se passe dans les différents scénarios présentés.

26. « Bien que la ville centre accueille un nombre important de fonctions métropolitaines (grands équipements, commerces de prestige…), les villes de l'agglomération ne sont pas pour autant reléguées au statut de "citésdortoirs" : elles développent une offre commerciale, économique et culturelle faisant de la communauté urbaine un système de villes en relation. » [A'URBA et LA CUB (2010)]

pour déployer tous ces éléments dans chaque pôle. Le polycentrisme permet de diminuer les temps de trajets [Zhao et al. (2017)] et est une des formes envisagées pour lutter contre l'étalement urbain [Emelianoff (2007a)] et pour « engager de nouvelles relations ville-campagne » [Géoconfluences (2019)].

VI.2. La conversion des terrains déjà artificialisés

Nous l'avons vu, la possibilité de convertir les terrains non répertoriés comme bâtis, routes, espaces naturels ou parkings publics, a été très largement utilisée par l'ensemble des scénarios. Les deux scénarios où la densification autour des axes de transport est privilégiée par une baisse des coûts d'investissement voient ainsi des changements sur d'importantes surfaces, possiblement permis par les économies réalisées en densifiant les zones internes. On peut tirer plusieurs leçons de telles modifications.

Une utilisation maximale de l'espace

Times-Urban étant un modèle d'optimisation, l'utilisation des territoires déjà artificialisés est maximisée dans les trajectoires proposées par l'occupation des surfaces par des bâtiments ou par des espaces naturels. Cela souligne l'importance de la gestion des friches industrielles et des logements abandonnés ou vacants dans les politiques urbaines. Nous en avons fait mention au chapitre 1 au moment d'exposer les changements survenant dans le monde de l'urbanisme aujourd'hui (voir section IV.2, p. 57), en particulier autour de l'urbanisme *alternatif* et des mouvements d'occupation de sites abandonnés ou en transition. Les conclusions des scénarios étudiés ici accentuent la pertinence de telles propositions.

Les villes doivent améliorer l'efficacité de gestion de leurs ressources. Cela rejoint partiellement les conclusions de O'Meara (1999), qui cite ainsi « l'eau, les matériaux, la nourriture et l'énergie », ressources auxquelles il faudrait ajouter les sols. Viguié et al. (2014a) suggèrent même qu'une réorganisation des infrastructures et des bâtiments est probablement nécessaire [27]. Ce besoin d'optimisation vaut aussi pour les espaces verts et peut ainsi être conduit par un établissement public tel que *l'Agence des Espaces Verts d'Île de France*. Dans le cas d'absence d'un tel garant d'une cohérence de l'organisation des espaces verts (en ceinture verte, en trames vertes, etc.), il est à craindre que ceux-ci continuent d'être peu à peu artificialisés [Orsenna et Gilsoul (2018)]. Orsenna et Gilsoul (2018) suggèrent d'ailleurs que l'intégration de la population par des « outils participatifs » dans cette préservation de la nature en ville contribue à la rendre réalisable.

Une flexibilité dans l'assignation d'occupation

Le simple fait de convertir des surfaces d'un usage à un autre présuppose une flexibilité à la fois juridique, économique mais aussi de la part des habitants et des acteurs locaux. De manière plus générale, on peut y voir un appel à plus de modularité dans la conception de nos espaces, sans toutefois uniformiser de

27. « *A re-engineering of the city, its buildings and infrastructure may even be required* » [Viguié et al. (2014a)].

façon trop importante la conception architecturale et la construction. Le principe d'ajouter de la modularité – pas tout à fait nouveau [Descombes (2019)] – est aujourd'hui une piste mentionnée pour l'« intégration du développement durable » ou la construction en milieux sociaux défavorisés [Petcou et Petrescu (2005) et Toubanos (2019)].

L'absence de marge de liberté

Aucun espace ne peut être inutilisé pour le modèle et nous n'avons pas intégré de caractéristiques liés à l'histoire, à la flânerie, à l'esthétique d'un lieu. Ces dimensions jouent pourtant un rôle dans l'aménagement et l'utilisation d'espaces et les *espaces libres* sont notamment des potentiels lieux de vie et de cohésion sociale des *grands ensembles* [Hatzfeld (2006) et Simorre (2015)]. D'après Simorre (2015), nous sommes mêmes passés des espaces *libres* aux espaces *publics* qui sont parfois réduits à leur fonction de lieu de passage malgré une liste importante de « *bienfaits* » pour « l'humain », « les équilibres naturels » et « l'économie ».

Ces trois notions sont finalement regroupables dans la réflexion menée notamment par plusieurs groupements d'*urbanisme alternatif* quant au rôle des espaces vides, car non habités, abandonnés par leurs occupants ou peu considérés. Ces démarches s'inscrivent le plus souvent dans une approche *solidaire*, dans un contexte plutôt marqué par une « déindustrialisation » voire parfois par un « rétrécissement urbain » de certaines parties des villes [Andres (2011) et Base (2019)]. Elles peuvent se faire par un squat illégal [Aguilera et Bouillon (2013)] mais se font aujourd'hui de plus en plus institutionnelles, comme les initiatives de Plateau Urbain, en « valoris[ant] un creux dans le marché sur lequel les acteurs immobiliers ne vont pas se positionner », en tirant profit du fait qu'une bonne partie des bâtiments passent « environ 10 % de [leur] vie inoccupé[s] » et en s'appuyant sur un modèle économique qui soulage le propriétaire d'une partie de la gestion de ses locaux vides [Grisot (2019)].

VI.3. L'utilisation d'un nombre réduit de archétypes de bâtiments

Quel que soit le scénario considéré, les nouveaux bâtiments utilisés et dans lesquels le modèle a investi sont exclusivement les archétypes suivants, par ordre décroissant d'importance des investissements : *Bâtiments de banlieue proche*, *Large bâtiment d'activité*, *Bâtiments de zones moyennement denses* et *ZA de Saint-Médard-en-Jalles* [28].

Les éventuelles implications de cette constatation doivent toutefois être nuancées, notre approche se concentrant en effet sur l'occupation des sols. Les problématiques entourant les bâtiments, qu'ils servent de logements ou de locaux d'activité, sont plus larges et intègrent des questions économiques, sociologiques, esthétiques et architecturales, énergétiques, et bien d'autres qui n'avaient pas leur place dans les modèles développés ici. Nous n'avons pas non plus proposé de formes alternatives de bâtiments, par exemple construits en terre crue (pisé,

28. Ces deux dernières formes n'étant qu'anecdotiquement mises à contribution (moins de 25 000 m^2 sur l'ensemble de la période pour toute la métropole).

torchis, bauge…), en briques crues (adobe, briques compressées…) ou encore en bois qui n'auraient pas eu d'avantages d'optimalité dans la structure actuelle de TIMES-URBAN. La prise en compte de résultats d'analyses en cycle de vie pourrait permettre d'intégrer pertinemment de tels archétypes originaux. Comme le note O'MEARA (1999), les bâtiments ne sont qu'une partie des problématiques urbaines, peut-être moins importante d'ailleurs que la question de l'étalement.

VI.4. Une hausse de température marquée

La croissance de la population et les modifications urbaines qui en découlent conduisent logiquement à une augmentation de la température dans tous les scénarios en 2050 par rapport à 2014. Ces hausses sont plus intenses dans le scénario où la population double mais aussi dans les deux scénarios de densification autour des axes de transport qui conduisent à une artificialisation moins équilibrées. Le seul scénario qui fait mieux que le scénario de référence est celui de « *Zéro artificialisation nette* » qui voit même de légères diminutions de la température par rapport au scénario de référence en 2050. Ces conclusions confirment l'importance de l'artificialisation du sol et incitent à considérer attentivement l'intégration de végétation et d'espaces naturels tôt dans le processus de conception et d'aménagement d'un quartier. Les bénéfices sur la santé humaine sont connus [DE MUNCK et al. (2017)] même si l'effet précis de la végétation en ville sur la pollution de l'air n'est pas encore complètement établi [P. KUMAR et al. (2019)].

VII. Brèves recommandations de stratégie urbaine

Trois points majeurs doivent, à notre avis à l'issue de cette étude, faire l'objet d'une intégration plus poussée et sérieuse dans les réflexions menant aux politiques d'aménagement urbain : (*i*) le *potentiel des périphéries* et d'une *décentralisation* des activités ; (*ii*) l'*optimisation des terrains déjà artificialisés*, soit par des procédés de densification, de surélévation, de rénovation ou de conversion, soit par la recherche de modularité et de mixité ; (*iii*) l'*intégration poussée d'éléments végétalisés* tôt dans la conception.

Conclusion

Cette thèse est fortement exploratoire, à mi-chemin entre la modélisation prospective et l'urbanisme, deux domaines primordiaux face aux crises environnementales et sociales actuelles que traversent les villes et, plus largement, nos sociétés humaines. En concilier les langages [29] n'est pas trivial, l'approche prospective mettant l'accent sur la projection temporelle tandis que l'urbanisme se concentre sur l'espace. Il s'agissait donc avant tout de procéder à des réconciliations : réconciliations d'échelles, réconciliations de l'espace et du temps, réconciliation de l'urbanisme et de la modélisation, réconciliation de la méthode scientifique et de la pratique opérationnelle. Les avancées proposées par ce document contribueront, nous l'espérons, à une plus large collaboration autour de la construction d'une ville durable et pérenne.

La métropole de Bordeaux est animée par cette envie de tracer une trajectoire future qui lui soit propre, qui corresponde aux désirs de ses habitants et qui lui permette de faire face aux enjeux principaux de cette époque. En témoignent les deux études prospectives « 50 000 logements » et *BM2050* lancées respectivement au début des années 2010 et en 2018. Ce travail souligne les potentiels qui s'ouvrent à un territoire et participera de cette démarche d'introspection et de projection de Bordeaux Métropole [30]. Pour parfaire la concrétisation de telles approches, il nous faut, en tant que société, « redonner de l'intérêt politique au temps long » [Behar (2017)].

Contributions

Nous avons commencé par constater dans le chapitre 1 que les villes sont soumises à des enjeux multiples : une crise environnementale majeure, des inégalités sociales criantes, une compétition internationale féroce favorisée par la diminution

29. Notamment dans la conception bergsonienne des langages, c'est-à-dire en ce qu'ils sont manipulateurs de la matière et de la réalité, comme nous l'avons vu dans la section III.2.c du chapitre 1, p. 46. Nous avons pu noter au cours de ce travail de thèse que ces similitudes de vocabulaire se retrouvent même plus loin, notamment par la commune prise en compte des spécificités du territoire considéré et l'utilisation de scénarios dans la description des trajectoires possibles. On pourrait même voir dans les différences de signification des termes communs utilisés par les deux disciplines, par exemple *scénario*, *projection*, *diagnostic*, des bribes de la réflexion de Cassirer sur la symbolisation [Eilenberger et Gepner (2019)]. Mais c'est peut-être pousser trop avant cet examen…

30. On pourra à ce sujet citer Beuze Edragas et Bouron (2019) : « comme tout discours sur l'espace, les opérations de marketing territorial ont un effet performatif sur les acteurs, et donc rétroactivement sur l'espace lui-même ».

des fonds publics et par un libéralisme exacerbé dans tous les domaines. Les villes doivent se construire judicieusement pour réinventer leur avenir et trois visions de *villes futures* émergent de la littérature. La *ville durable* favorise le respect de l'environnement par une solidarité intergénérationnelle, et la cohésion sociale, la *ville intelligente technologique* ou *smart-city*, recherche l'efficacité et l'optimisation, particulièrement grâce à l'appui de la technologie, tandis que la *ville intelligente collective* ou *durable* tente de faire la synthèse de ces propositions en intégrant plus largement les citoyens dans la réflexion. Le fonctionnement de l'aménagement urbain en France est en pleine transformation et c'est là l'occasion de prendre en compte ces enjeux. Le recours à la modélisation pour l'étude des trajectoires souhaitables pour les villes françaises est possible et la littérature scientifique abondante de modèles urbains encourage notre proposition d'une approche de modélisation prospective inspirée des nombreux travaux sur la modélisation long-terme pour l'énergie.

La construction d'un tel modèle s'appuie nécessairement sur une représentation quantitative du territoire considéré. Les récents progrès réalisés sur l'accessibilité des données publiques mais aussi autour des algorithmes d'analyse de ces données, ainsi que les limites constatées sur l'intégration des systèmes d'information géographique dans le monde de l'urbanisme, nous ont conduit, dans le chapitre 2, à développer une approche inspirée des travaux de M. Bonhomme (2013), pour la création d'archétypes de *formes urbaines* et de *bâtiments*. Cette méthodologie s'appuie notamment sur la récupération et le traitement d'un large panel de données sur la métropole bordelaise, et sur des algorithmes classiques d'analyse de données, tels que l'*Analyse en Composantes Principales* et la méthode des *k-means*. Les archétypes alors créés sont ensuite décrits plus précisément et caractérisés par plusieurs paramètres.

La description des modèles conçus dans le cadre de ce travail de thèse fait l'objet du chapitre 3. Ceux-ci sont au nombre de trois et sont utilisés séquentiellement. Le premier d'entre eux, Times-Urban, est séparé en deux secteurs (sols et transport), le secteur des sols étant organisé autour des archétypes décrits précédemment. Cette forme originale de modèle s'inspire de la famille *TIMES* mais aboutit à remplacer le *système énergétique de référence* classique par un *système d'aménagement de référence* qui tente de suivre les principes de l'urbanisme. Times-Urban permet de déterminer une trajectoire optimale sous contraintes d'évolution de l'occupation des sols à l'échelle de 19 zones du territoire de la métropole de Bordeaux. Les résultats obtenus sont ensuite distribués géographiquement dans chaque zone par Urban-Spatializer. Ce dernier, modèle également basé sur un paradigme optimal, répartit les investissements et changements calculés par Times-Urban en tenant compte de contraintes spatiales sous la forme de cartes de probabilités (ce qui facilite la manipulation et la représentation), et de la compatibilité entre les archétypes. Enfin, à partir de cette représentation spatiale fine construite par Urban-Spatializer, nous estimons la température au niveau du sol en utilisant notre troisième et dernier modèle, Urban-TempÊst. Ce dernier est basé sur une structure innovante de réseau de neurones qui exploite les seules informations relatives à l'occupation des sols et aux bâtiments pour produire une prédiction de la température en un point.

Déclinés à un cas réel, celui de la métropole de Bordeaux, ces modèles nous ont permis de proposer l'étude de trois scénarios prospectifs à l'horizon 2050 dans

le chapitre 4, scénarios que nous avons comparés à une trajectoire de référence. Le **premier scénario** s'est penché sur le **doublement de la population** bordelaise sur la période considérée et sur les conséquences potentielles d'une telle tension démographique sur l'urbanisme. Nous avons notamment vu que le territoire peut accueillir une telle croissance mais au prix d'une densification et d'une urbanisation majeures qui imposeraient la transformation importante de territoires ruraux. Le plan national **Zéro artificialisation nette** a été le sujet du **deuxième scénario** afin d'étudier l'impact de la politique nationale de 2015. La trajectoire dessinée par notre chaîne de modélisations souligne l'optimisation de l'utilisation des espaces existants, avec l'occupation de tous les terrains déjà artificialisés et la conversion de zones d'activités. Cela soulève notamment la question de formes architecturales originales nécessaires pour la réalisation de tels projets. Enfin, le **troisième scénario** interroge l'effet de la **densification autour des axes de transports en commun** souvent considérée comme une solution efficace pour diminuer l'empreinte environnementale des villes [31]. Ces territoires ne sont pas suffisants pour recevoir l'ensemble de la croissance de la population et les périphéries sont, à nouveau, largement mises à contribution, invitant peut-être à une décentralisation des centres économiques et sociaux de la métropole.

De cette étude, nous avons tirés quelques principes généraux communs à l'ensemble de ces scénarios : (*i*) les périphéries sont largement impliquées dans le développement urbain et des politiques adaptées doivent être mises en place ; (*ii*) plutôt que de continuer à envahir les surfaces non artificialisés, il est préférable de convertir les terrains déjà artificialisés par l'optimisation de l'utilisation de l'espace (par exemple, en diminuant l'emprise des routes, des parkings, des surfaces commerciales…) ; (*iii*) seules quelques formes spécifiques de bâtiments sont utilisées par notre modèle [32] ; (*iv*) enfin, il faut s'attendre dans tous les cas à une hausse de la température marquée dans les zones denses et à des effets d'îlots de chaleur urbains intenses, ce qui impose la mise en place de plans préventifs et de gestion de crise pour les événements caniculaires de plus en plus fréquents.

Limites et perspectives

Ce travail a construit une approche unique qui concatène plusieurs modèles, chacun d'entre eux étant perfectible et ouvrant de larges perspectives.

Appliquer la méthodologie à d'autres métropoles françaises permettrait de s'assurer de l'efficacité des moyens utilisés et des modèles développés. En particulier, la création d'archétypes sur plusieurs territoires à travers le pays donnerait des moyens de comparaisons plus fiables avec des bases de données nationales des constructions en France. On obtiendrait alors une base nationale d'archétypes de bâtiments ou de formes urbaines dont on pourrait faire émerger un ensemble d'objets manipulables et combinables pour la création de modèles locaux. En outre, une telle comparaison renseignerait sur les caractéristiques régionales de l'urbanisme et enrichirait la prise de décisions territoriales adaptées.

31. Efficace financièrement également, les infrastructures de transport représentant des investissements considérables pour une collectivité.

32. Nous avons précisé dans le chapitre correspondant que cette dernière conclusion devait être considérée avec précaution au vu des hypothèses de construction de notre chaîne de modélisation.

Une autre perspective serait de réaliser des enquêtes qualitatives auprès d'acteurs locaux, d'habitants, etc., pour recueillir leur avis sur les archétypes créés par cette technique. De la sorte, on disposerait d'informations supplémentaires pour la caractérisation des quartiers de la métropole.

Les résultats fournis par les différents scénarios présentés dans ce chapitre dessinent également quelques limites à l'approche développée ici. Nous en listons les principales en précisant des pistes de résolution envisageables.

- *La création de trajectoires possibles pour* TIMES-URBAN *mais non transposables par* URBAN-SPATIALIZER
  Cette situation s'est présentée plus spécifiquement dans les scénario BT et T lorsqu'il n'y avait pas suffisamment de surfaces modifiables à proximité des axes de transport pour y intégrer les investissements choisis par TIMES-URBAN.

… *Il est possible de dresser une interprétation d'une telle situation en proposant que des modifications soient faites à certaines lignes de bus, ou que des navettes supplémentaires soient mises en place pour desservir les zones* a priori *lointaines des axes de transport.*

- *L'abandon complet du secteur du transport dans les analyses*
  Il est difficile de représenter un secteur du transport dans le modèle de la façon dont nous avons choisi de le faire : en effet, d'un point de vue strictement optimal, l'objet route en lui-même est en partie absurde puisqu'il est inutilisé pendant la majeure partie du temps. TIMES-URBAN a donc logiquement tendance à désaffecter une large partie des routes pour n'investir que dans de faibles longueurs de routes utilisées toutefois à 100 %. Cela questionne fondamentalement notre rapport à la voiture et aux modes de déplacements.

… *Cette première tentative de représentation est prometteuse en ce qu'elle incorpore déjà des éléments spécifiques aux milieux urbains et à la réflexion urbanistique. Pour autant, une étude supplémentaire doit être faite pour parfaire la calibration de l'année de référence et poursuivre cette intégration. L'insertion de données énergétiques est une première piste.*

- *L'absence de secteurs cruciaux pour l'aménagement des villes*
  La problématique des équipements publics (santé, culture, justice, police, etc.) est bien évidemment primordiale pour la qualité et la bonne tenue d'une ville. Nous avons choisi de privilégier le développement des questions principales soulevées par l'étude bibliographique et les échanges avec les urbanistes d'ANMA plutôt que de chercher à tout prix à intégrer un maximum d'éléments dans TIMES-URBAN.

… *TIMES-URBAN doit être complété par d'autres secteurs urbains pour combler ces manques. Cela implique l'usage de certaines données dont nous ne disposons pas forcément pour l'instant ou bien la construction de celles-ci.*

La maille géographique utilisée au cours de cette thèse semble avoir fait ses preuves. La mise à jour des données utilisées [33] pour une année de référence plus récente contribuerait toutefois à réancrer l'exercice dans le visage actuel de Bor-

33. Une nouvelle version de la *BDTOPO* de l'IGN est ainsi disponible depuis plusieurs mois maintenant, enrichie d'informations dont nous ne disposions pas nécessairement. De même, une nouvelle version des données de *Corine Land Cover* est régulièrement publiée.

deaux Métropole. On pourrait suggérer d'ajouter des données supplémentaires pour enrichir la méthodologie, de sources privées ou moins répandues. Ce serait des perspectives intéressantes, si tant est qu'un tel ajout est justifié par une visée particulière, le prix de telles modifications étant la perte de la réplicabilité de la démarche.

L'application de URBAN-TEMPÊST à des données correspondant à d'autres régions ou bien à d'autres versions plus récentes de la métropole bordelaise serait toutefois intéressant pour en vérifier la robustesse et éventuellement en améliorer l'efficacité avec une variété plus importante de données d'entraînement.

TIMES-URBAN et URBAN-TEMPÊST sont en effet *a priori* largement spécifiques au territoire de Bordeaux Métropole. *A contrario*, URBAN-SPATIALIZER n'est qu'un modèle de distribution géographique et peut être repris tel quel, en modifiant bien évidemment les paramètres associés à la géographie bordelaise, sur d'autres territoires. L'utilisation de cartes de contraintes dans le cadre d'une projection spatiale d'informations urbaines est, à notre connaissance, plutôt original et en adéquation avec la collaboration avec des urbanistes. Une telle méthode ouvre des perspectives de valorisation scientifique prometteuses.

Enfin, il apparaît difficile de ne pas tenter, pour poursuivre le travail de cette thèse, de paramétrer des scénarios de *smart city* et de *ville durable*. Toutefois, comme suggéré dans ce document, ces *villes futures* ne correspondent pas à un état mais véritablement à une trajectoire. Cet exercice impliquerait donc de caractériser certaines politiques ou certaines pratiques urbanistiques comme ayant trait à ces visions. Par exemple, une modification de l'efficacité des infrastructures traduirait l'optimisation des trajets urbains par des algorithmes dans une *smart city*. Ou encore, l'ajout d'incitations financières à la rénovation énergétique et à l'entretien de bâtiments anciens correspondrait à une démarche de *ville durable*.

Quelques remarques sur les possibilités de couplages

Le couplage de plusieurs modèles est généralement une perspective avancée pour enrichir une approche. On propose ainsi, par l'intégration dans un modèle plus complet, la mise en place d'un problème multi objectif, ou encore l'ajout de contraintes supplémentaires, d'ajouter au modèle des dimensions jusque-là absentes ou exogènes.

TIMES-URBAN peut ainsi fournir un problème esclave au problème maître d'optimisation d'un modèle TIMES énergétique classique. Pour cela, il faudrait adapter le modèle maître pour que les secteurs résidentiel et transport ressemblent à ceux de TIMES-URBAN qui fixerait alors certains stocks au fur et à mesure. Une version relaxée de ce fonctionnement peut être obtenue en ajoutant des contraintes par les résultats du modèle dit *esclave*. Le fait que des **infrastructures de transport** et donc des modes de transport soient préférés pour l'occupation des sols a une influence forte sur la consommation énergétique. On peut imaginer la création de plusieurs niveaux de contraintes :

1. forçant une certaine fourchette des technologies de mobilité correspondant à celles choisies par le premier modèle ;
2. comparant systématiquement avec un scénario dans lequel on ne contraint pas du tout les technologies de mobilité.

De même, l'absence des bâtiments ou du sol dans le modèle TIMES-France [34] actuel impose d'employer des moyens contournés pour considérer les contraintes impliquées par celui-ci. La présence de certains bâtiments plutôt que d'autres peut conduire, à partir des analyses de corrélations entre logements et consommation d'énergie, à contraindre les types de chauffage à partir des résultats du modèle d'occupation des sols. Toutes ces améliorations potentielles peuvent être envisagées dans des développements futurs du modèle TIMES-URBAN ou des raffinements de modèles nationaux (comme TIMES-France) ou régionaux (comme TIMES-SUDPACA [ANDRADE et SELOSSE (2019)] ou TIMES-Normandie).

Une dernière approche pour réaliser un couplage avec un modèle énergétique serait d'employer les méthodes d'estimation de la consommation énergétique pour associer les archétypes ou même les cartes de URBAN-SPATIALIZER à une consommation d'électricité et de gaz (par exemple). On aurait alors fixé l'évolution de la demande exogène du modèle TIMES classique dont on pourrait étudier l'impact sur le système énergétique régional.

Propos conclusif

L'enrichissement des modèles prospectifs par des études multidisciplinaires continue d'ouvrir des perspectives très diverses. En particulier, cette étape que nous proposons pour renforcer le dialogue entre la communauté scientifique et les décideurs pour mieux faire face aux enjeux actuels. Ainsi, ce travail à la lisière de l'urbanisme et de la modélisation prospective contribue modestement aux réflexions nécessaires autour de l'impact de nos actions et plus largement sur la portée des décisions que nous prenons au regard des villes qui abritent et voient grandir tant d'entre nous.

34. Ce modèle est une déclinaison des modèles énergétiques « classiques » au périmètre de la France. Maintenu par le Centre de Mathématiques Appliquées, il a fait l'objet de nombreux ajouts notamment par ASSOUMOU (2006) et des travaux de thèses [ASSOUMOU (2006), DOUDARD (2018) et MILLOT (2019)].

Bibliographie

Aboelata, A. & Sodoudi, S. (2019). Evaluating Urban Vegetation Scenarios to Mitigate Urban Heat Island and Reduce Buildings' Energy in Dense Built-up Areas in Cairo. *Building and Environment*, *166*, 106407. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106407 (cf. p. 21, 117)

Acheampong, R. A. & Silva, E. A. (2015). Land Use–Transport Interaction Modeling : A Review of the Literature and Future Research Directions. *Journal of Transport and Land Use*, *8*(3), 11-38 (cf. p. 78, 116, 138, 188).

Acs, G. & Castelluccia, C. (2014). A Case Study : Privacy Preserving Release of Spatio-Temporal Density in Paris. *Proceedings of the 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1679-1688. https://doi.org/10.1145/2623330.2623361 (cf. p. 116)

Adam, C. & Moulinié, M. (2005a). Appréhender la densité 1 : Les repères historiques. *Note rapide sur l'occupation du sol*, (382), 6. Récupérée 12 octobre 2018, à partir de https://www.iau-idf.fr/savoir-faire/nos-travaux/edition/apprehender-la-densite-1.html (cf. p. 63, 64, 107, 108, 137, 142, 143)

Adam, C. & Moulinié, M. (2005b). Appréhender la densité 2 : Les indicateurs de densité. *Note rapide sur l'occupation du sol*, (383), 4. Récupérée 12 octobre 2018, à partir de https://www.iau-idf.fr/savoir-faire/nos-travaux/edition/apprehender-la-densite-2.html (cf. p. 64, 107, 108, 142)

Adam, C. & Moulinié, M. (2005c). Appréhender la densité 3 : Formes urbaines et densités. *Note rapide sur l'occupation du sol*, (384), 6. Récupérée 12 octobre 2018, à partir de https://www.iau-idf.fr/savoir-faire/nos-travaux/edition/apprehender-la-densite-3.html (cf. p. 64, 107, 108, 142)

ADEME. (2018). *La face cachée des objets : vers une consommation responsable* (Dossier de presse). ADEME. (Cf. p. 17).

ADEME. (2020). La base des diagnostics de performance énergétique (DPE) - data.gouv.fr. (Cf. p. 136).

Adolphe, L. (2001). A Simplified Model of Urban Morphology : Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities. *Environment and Planning B : Planning and Design*, *28*(2), 183-200. https://doi.org/10.1068/b2631 (cf. p. 139)

Adolphe, L. (2002). SAGACités : Towards a management aided system for integrating outdoor climate into the design of urban spaces. Récupérée 11 octobre 2017, à partir de ftp://ip20017719.eng.ufjf.br/Public/AnaisEventosCientificos/PLEA_2002/2_METHODS_TOOLS/ADOLPHE.PDF (cf. p. 128, 139, 142, 143)

AFP & Figaro, L. (2020). Traçage : débat et vote le 27 mai à l'Assemblée nationale. (Cf. p. 40).

Agra de Lemos Martins, T. (2014, mars 31). *Des Contraintes Solaires à Des Opportunités de Projet Urbain : Optimisation de Typomorphologies Urbaines En Climat Tropical Au Brésil* (thesis). Toulouse, INSA. Récupérée 18 octobre 2018, à partir de http://www.theses.fr/2014ISAT0011. (Cf. p. 128, 139, 142)

Aguilera, T. & Bouillon, F. (2013). Le squat, un droit à la ville en actes. *Mouvements*, *n° 74*(2), 132-142 (cf. p. 310).

Agyemang, F. S. K., Silva, E. & Anokye, P. A. (2018). Towards Sustainable Urban Development : The Social Acceptability of High-Rise Buildings in a Ghanaian City. *GeoJournal*, *83*(6), 1317-1329. https://doi.org/10.1007/s10708-017-9837-0 (cf. p. 201)

Ahvenniemi, H., Huovila, A., Pinto-Seppä, I. & Airaksinen, M. (2017). What Are the Differences between Sustainable and Smart Cities ? *Cities*, *60*, 234-245. https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.009 (cf. p. 32-35, 38, 41, 42, 44, 370)

Aksoezen, M., Daniel, M., Hassler, U. & Kohler, N. (2015). Building age as an indicator for energy consumption. *Energy and Buildings*, *87*, 74-86. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.074 (cf. p. 107, 132, 143)

Al Nuaimi, E., Al Neyadi, H., Mohamed, N. & Al-Jaroodi, J. (2015). Applications of big data to smart cities. *Journal of Internet Services and Applications*, *6*(1), 25. https://doi.org/10.1186/s13174-015-0041-5 (cf. p. 37-39, 41, 90)

Alba, D., Brunner, C. & Gilli, F. (2017). Pour une approche ouverte des projets urbains - Métropolitiques. (Cf. p. 2).

Albert, L. (2018). Open data : malgré la loi, la route est encore longue pour les collectivités. *Les Echos* (cf. p. 98).

Albert, L. (2020). Friches, zones commerciales, le nouveau dossier chaud des élus locaux. *Les Echos* (cf. p. 268).

Albino, V., Berardi, U. & Dangelico, R. M. (2015). Smart Cities : Definitions, Dimensions, Performance, and Initiatives. *Journal of Urban Technology*, *22*(1), 3-21. https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942092 (cf. p. 37, 39-41) _eprint : https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942092

Alexander Wandl, D. I., Nadin, V., Zonneveld, W. & Rooij, R. (2014). Beyond Urban–Rural Classifications : Characterising and Mapping Territories-in-between across Europe. *Landscape and Urban Planning*, *130*, 50-63. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.06.010 (cf. p. 110)

Alhamwi, A., Medjroubi, W., Vogt, T. & Agert, C. (2017). GIS-Based Urban Energy Systems Models and Tools : Introducing a Model for the Optimisation of Flexibilisation Technologies in Urban Areas. *Applied Energy*, *191*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.048 (cf. p. 78, 79, 81)

Ali-Toudert, F. & Mayer, H. (2006). Numerical Study on the Effects of Aspect Ratio and Orientation of an Urban Street Canyon on Outdoor Thermal Comfort in Hot and Dry Climate. *Building and Environment*, *41*(2), 94-108. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013 (cf. p. 20, 66, 215)

Aljoufie, M., Zuidgeest, M., Brussel, M., van Vliet, J. & van Maarseveen, M. (2013). A cellular automata-based land use and transport interaction model applied to Jeddah, Saudi Arabia. *Landscape and Urban Planning*, *112*, 89-99. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.01.003 (cf. p. 77)

Allegrini, J., Orehounig, K., Mavromatidis, G., Ruesch, F., Dorer, V. & Evins, R. (2015). A Review of Modelling Approaches and Tools for the Simulation of District-Scale Energy Systems. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, *52*, 1391-1404. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.123 (cf. p. 76, 79, 118)

Allen, A. (2016). Environmental Planning and Management of the Peri-Urban Interface : Perspectives on an Emerging Field : *Environment and Urbanization*. https://doi.org/10.1177/095624780301500103 (cf. p. 180)

Allison Bridges. (2018). The rise of cities in the battle against climate change [newspaper]. *phys.org*. Récupérée 19 avril 2018, à partir de https://phys.org/news/2018-03-cities-climate.html (cf. p. 29)

Allix, G. (2018). Urbanisme, transports, fiscalité : les villes américaines doivent-elles en passer par la volonté d'Amazon ? *Le Monde.fr* (cf. p. 41).

Allix, G. (2019). Le big data au secours du commerce de centre-ville. *Le Monde.fr* (cf. p. 90).

Alter, L. (2014). Cities need Goldilocks housing density – not too high or low, but just right [newspaper]. *The Guardian : Life and style*. Récupérée 7 mai 2018, à partir de http://www.theguardian.com/lifeandstyle/2014/apr/16/cities-need-goldilocks-housing-density-not-too-high-low-just-right (cf. p. 66)

Alvarez Melis, D. & Jaakkola, T. (2018). Towards Robust Interpretability with Self-Explaining Neural Networks. In S. Bengio, H. Wallach, H. Larochelle, K. Grauman, N. Cesa-Bianchi & R. Garnett (Éd.), *Advances in Neural Information Processing Systems 31* (p. 7775-7784). Curran Associates, Inc. Récupérée 28 septembre 2020, à partir de http://papers.nips.cc/paper/8003-towards-robust-interpretability-with-self-explaining-neural-networks.pdf. (Cf. p. 91)

Amado, M., Poggi, F. & Amado, A. R. (2016). Energy Efficient City : A Model for Urban Planning. *Sustainable Cities and Society*, *26*, 476-485. https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.011 (cf. p. 66)

Amouriaux, C. (2020). Nantes : des manifestants du grand ouest mobilisés contre "la bétonisation et les projets destructeurs". *France 3 Pays de la Loire* (cf. p. 57).

Anandarajah, G. & Strachan, N. (2010). Interactions and Implications of Renewable and Climate Change Policy on UK Energy Scenarios. *Energy Policy*, *38*(11), 6724-6735. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.042 (cf. p. 82)

Andersen, K. S. (2018). Bridging the Gap Using Energy Services : Demonstrating a Framework for Soft Linking Top down and Bottom up Models. (Cf. p. 100).

Andrade, C. & Selosse, S. (2019). Modeling Low-Carbon Energy Transition in the Territories : A TIMES-SUD PACA Model to Assess a Long-Term Decarbonization Strategy for the South-East Region of France. *11th International Conference on Applied Energy (ICAE2019)* (cf. p. 318).

Andres, L. (2011). Les usages temporaires des friches urbaines, enjeux pour l'aménagement. *Métropolitiques* (cf. p. 310).

Angles, B. (2012). Les partenariats public-privé : l'avenir du financement des infrastructures. *Revue d'economie financiere*, *N° 108*(4), 221-230 (cf. p. 55).

APUR. (2003). *Densités vécues et formes urbaines : étude de quatre quartiers parisiens* (rapp. tech.). APUR. (Cf. p. 65, 95).

Arab, N. (2007). Activité de projet et aménagement urbain : les sciences de gestion à l'épreuve de l'urbanisme. *Management Avenir*, *n° 12*(2), 147-164 (cf. p. 50).

Arampatzis, G., Kiranoudis, C. T., Scaloubacas, P. & Assimacopoulos, D. (2004). A GIS-Based Decision Support System for Planning Urban Trans-

portation Policies. *European Journal of Operational Research*, *152*(2), 465-475. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00037-7 (cf. p. 79, 82, 101)

Arantes, L., Marry, S., Baverel, O. & Quenard, D. (2016). Efficacité énergétique et formes urbaines : élaboration d'un outil d'optimisation morpho-énergétique. *Cybergeo : European Journal of Geography*. https://doi.org/10.4000/cybergeo.27584 (cf. p. 70)

Armengaud, M. (2016). Notes sur le moment alternatif des grands espaces publics métropolitains. *L'Observatoire*, *N° 48*(2), 83-86 (cf. p. 57, 59).

Arnaud, P. (2013). Exception américaine ? *Outre-Terre*, *N° 37*(3), 159-173 (cf. p. 24).

ARS & A'Urba. (2015). Guide PLU et santé environnementale. (Cf. p. 52).

ARTELYS. (2014). *Design of a Decision Support Tool for Sustainable, Reliable and Cost-Effective Energy Strategies in Cities and Industrial Complexes* (Rapport Final). (Cf. p. 102, 103).

Article L110-1 (2003, juillet 3). Récupérée 6 octobre 2020, à partir de https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000038845984 (cf. p. 187)

Ascione, F., De Masi, R. F., de Rossi, F., Fistola, R., Sasso, M. & Vanoli, G. P. (2013). Analysis and Diagnosis of the Energy Performance of Buildings and Districts : Methodology, Validation and Development of Urban Energy Maps. *Cities*, *35*, 270-283. https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.04.012 (cf. p. 78, 79, 118)

Assoumou, E. (2006, juin 22). *Modélisation MARKAL pour la planification énergétique long terme dans le contexte français* (thèse de doct.). École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Récupérée 24 septembre 2018, à partir de https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00002752/document. (Cf. p. 194, 200, 318, 450)

Assoumou, E. & Maïzi, N. (2011). Carbon Value Dynamics for France : A Key Driver to Support Mitigation Pledges at Country Scale. *Energy Policy*, *39*(7), 4325-4336. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.050 (cf. p. 82)

Astier, M. (2019). Grands projets destructeurs : l'esbroufe de la « compensation écologique ». (Cf. p. 187).

Atlantic, T. (2018). The City of the Future Is a Data-Collection Machine. (Cf. p. 94).

Atlasocio. (2019). Classement des États du monde par inégalité de revenus (coefficient de Gini). (Cf. p. 24).

Atlasocio. (2020). Classement des États du monde selon la part des revenus détenus par les 10 % les plus riches. (Cf. p. 24).

Attali, J. (2015). *Peut-on prévoir l'avenir ? Le sien, celui des autres*. Fayard. (Cf. p. 148) OCLC : 921860440.

A'Urba & La CUB. (2010). *Traits et dynamiques de la métropole bordelaise* (rapp. tech.). A'urba / CUB. (Cf. p. 308).

Bahn, O., Marcy, M., Vaillancourt, K. & Waaub, J.-P. (2013). Electrification of the Canadian Road Transportation Sector : A 2050 Outlook with TIMES-Canada. *Energy Policy*, *62*, 593-606. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.023 (cf. p. 194)

Ballarini, I., Corgnati, S. P. & Corrado, V. (2014). Use of Reference Buildings to Assess the Energy Saving Potentials of the Residential Building Stock : The Experience of TABULA Project. *Energy Policy*, *68*, 273-284. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.027 (cf. p. 106)

Ballereau, A., CUB & Bordeaux. (2014). Les bassins à flot : un patrimoine vivant. (Cf. p. 54).

Baltzer, F. (2018). Quelle politique foncière pour l'Île-de-France ? *L'Economie politique*, *N° 78*(2), 40-53 (cf. p. 55, 59, 60).

Banarse, D. S., France, I. & Duller, A. W. G. (2000). Analysis and application of a self-organising image recognition neural network. *Advances in Engineering Software*, *31*(12), 937-944. https://doi.org/10.1016/S0965-9978(00)00066-1 (cf. p. 90)

Banque mondiale. (2010a). *Cities and Climate Change : An Urgent Agenda* (rapp. tech.). (Cf. p. 16, 18, 19, 28, 29, 63, 201).

Banque mondiale. (2010b). *Cities and Climate Change : An Urgent Agenda* (rapp. tech.). (Cf. p. 17).

Banque mondiale. (2016). COP 22 : Three New Ways to Help Cities Reach Their Climate Goals. (Cf. p. 17).

Baranton, J. (2020). Construire toujours plus grand, toujours plus haut. (Cf. p. 369).

Baraud-Serfaty, I., Fourchy, C. & Rio, N. (2018). *Qui gouvernera la ville (de) demain ?* (Rapp. tech.). Ibicity / Partie prenante / Espelia / ADEME / Banque des territoires. (Cf. p. 60).

Barba-Sánchez, V., Arias-Antúnez, E. & Orozco-Barbosa, L. (2019). Smart Cities as a Source for Entrepreneurial Opportunities : Evidence for Spain. *Technological Forecasting and Social Change*, *148*, 119713. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119713 (cf. p. 1, 28)

Barbič, J., Safonova, A., Pan, J.-Y., Faloutsos, C., Hodgins, J. K. & Pollard, N. S. (2004). Segmenting Motion Capture Data into Distinct Behaviors. *Proceedings of Graphics Interface 2004*, 185-194 (cf. p. 90).

Barbosa, L., Pham, K., Silva, C., Vieira, M. R. & Freire, J. (2014). Structured Open Urban Data : Understanding the Landscape. *Big Data*, *2*(3), 144-154. https://doi.org/10.1089/big.2014.0020 (cf. p. 90)

Barjavel, R. (2007). *Ravage*. Denoël. (Cf. p. 15)
OCLC : 255954683.

Barles, S. (2002). Le métabolisme urbain et la question écologique. *Les Annales de la recherche urbaine*, *92*(1), 143-150. https://doi.org/10.3406/aru.2002.2469 (cf. p. 101, 113, 117)

Barles, S. (2009). Urban Metabolism of Paris and Its Region. *Journal of Industrial Ecology*, *13*(6), 898-913. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00169.x (cf. p. 79)

Barles, S. (2010). Estelle Baret-Bourgoin, La ville industrielle et ses poisons, Les mutations des sen sibilités aux nuisances et pollutions industrielles à Grenoble, 1810-1914. Grenoble, Presse Universitaires de Grenoble, 2005. *Histoire urbaine*, *n° 27*(1), 149-152 (cf. p. 10).

Barles, S. (2015). The Main Characteristics of Urban Socio-Ecological Trajectories : Paris (France) from the 18th to the 20th Century. *Ecological Economics*, *118*, 177-185. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.027 (cf. p. 113, 114)

Barley, S. R. & Bechky, B. A. (1994). In the Backrooms of Science : The Work of Technicians in Science Labs. *Work and Occupations*, *21*(1), 85-126. https://doi.org/10.1177/0730888494021001004 (cf. p. 89)

Barroux, R. (2019). Les opposants au projet EuropaCity attirent des candidats aux européennes. *Le Monde.fr* (cf. p. 57).

Bart, I. L. (2010). Urban Sprawl and Climate Change : A Statistical Exploration of Cause and Effect, with Policy Options for the EU. *Land Use Policy*, *27*(2), 283-292. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.03.003 (cf. p. 67)

Barthélémy, S. (2019). De plus en plus de pauvres à Bordeaux et en Gironde. (Cf. p. 24).

BASE. (2019). Genre dans la ville. (Cf. p. 24).

Base. (2019). Urbanisme transitoire. (Cf. p. 310).

Beebeejaun, Y. (2017). Gender, Urban Space, and the Right to Everyday Life. *Journal of Urban Affairs*, *39*(3), 323-334. https://doi.org/10.1080/07352166.2016.1255526 (cf. p. 24)
_eprint : https://doi.org/10.1080/07352166.2016.1255526

Behar, D. (2017). Aménagement du territoire : le temps long de la planification a-t- il encore un avenir ?, 5 (cf. p. 50, 313).

Belussi, L., Danza, L., Ghellere, M., Guazzi, G., Meroni, I. & Salamone, F. (2017). Estimation of Building Energy Performance for Local Energy Policy at Urban Scale. *Energy Procedia*, *122*, 98-103. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.379 (cf. p. 79)

Benoiston de Chateauneuf, Chevallier, Devaux, L., Millot, L., Duchâtelet, P., Petit de Maurienne, Pontonnier, Trébuchet, Villermé & Villot. (1834). *Rapport Sur La Marche et Les Effets Du Choléra-Morbus Dans Paris et Les Communes Rurales Du Département de La Seine : Année 1832 ([Reprod.]) / Par La Commission Nommée, Avec l'approbation de M. Le Ministre Du Commerce et Des Travaux Publics, Par MM. Les Préfets de La Seine et de Police*. (Cf. p. 96).

Bentley, I., Alcock, A., Murrain, P., McGlynn, S. & Smith, G. (1989). *Responsive Environments : A Manual for Designers* (Architectural Press). Elsevier. (Cf. p. 138).

Bercy Infos. (2020, juillet 20). *Pouvez-vous utiliser votre logement comme local professionnel ?* Récupérée 6 octobre 2020, à partir de https://www.economie.gouv.fr/entreprises/logement-local-professionnel. (Cf. p. 186)

Bernard-Hohm, M.-C., Maître, J., Chignac, P., Delage, A. & Tastet, S. (2011). *L'usage de la ville par le genre* (C. Rasselet, Éd. ; Rapport d'étude). A'urba / ADES - CNRS. Bordeaux. (Cf. p. 24).

Bertrand, M. (2008). Cadastre, à quoi sert-il ? *Le Particulier Immobilier (Figaro)* (cf. p. 98).

Besse, C. (2016). Etoile Voltaire : un choix controversé pour le 14 avenue Parmentier [magazine]. *Télérama*. Récupérée 6 octobre 2020, à partir de https://www.telerama.fr/cinema/etoile-voltaire-un-choix-controverse-pour-le-14-avenue-parmentier,137892.php (cf. p. 186)

Bettencourt, L. M. A., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C. & West, G. B. (2007). Growth, Innovation, Scaling, and the Pace of Life in Cities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(17), 7301-7306. https://doi.org/10.1073/pnas.0610172104 (cf. p. 1, 28)

Beucher, S. (1994). Watershed, Hierarchical Segmentation and Waterfall Algorithm. In M. A. Viergever, J. Serra & P. Soille (Éd.), *Mathematical Morphology and Its Applications to Image Processing* (p. 69-76). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1040-2_10. (Cf. p. 204, 212)

Beuze Edragas, F. & Bouron, J.-B. (2019). Notion en débat : marketing territorial — Géoconfluences. (Cf. p. 313, 367-371).

Bhatta, B. (2009). Analysis of Urban Growth Pattern Using Remote Sensing and GIS : A Case Study of Kolkata, India. *International Journal of Remote Sensing*, *30*(18), 4733-4746. https://doi.org/10.1080/01431160802651967 (cf. p. 70, 101)

Billen, G., Garnier, J. & Barles, S. (2012). History of the urban environmental imprint : Introduction to a multidisciplinary approach to the long-term relationships between Western cities and their hinterland. *Regional Environmental Change*, *12*(2), 249-253. https://doi.org/10.1007/s10113-012-0298-1 (cf. p. 114)

Birkhäuser. (2018). Building Types Online. (Cf. p. 106).

Bisello, A., Vettorato, D., Laconte, P. & Costa, S. (Éd.). (2018). *Smart and sustainable planning for cities and regions : Results of SSPCR 2017* (1st edition 2018). Springer International Publishing. (Cf. p. 38, 39)
OCLC : 1033670242.

Bisello, A., Vettorato, D., Stephens, R. & Elisei, P. (Éd.). (2017). *Smart and sustainable planning for cities and regions : Results of SSPCR 2015*. Springer. (Cf. p. 39).

Blanc, S. (2013). Open data : quels coûts pour les collectivités territoriales. *La Gazette des Communes* (cf. p. 98).

Blanco, H., Codina, V., Laurent, A., Nijs, W., Maréchal, F. & Faaij, A. (2020). Life Cycle Assessment Integration into Energy System Models : An Application for Power-to-Methane in the EU. *Applied Energy*, *259*, 114160. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114160 (cf. p. 194)

Blesl, M., Kober, T., Bruchof, D. & Kuder, R. (2010). Effects of Climate and Energy Policy Related Measures and Targets on the Future Structure of the European Energy System in 2020 and Beyond. *Energy Policy*, *38*(10), 6278-6292. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.018 (cf. p. 82)

Bliss, L. (2017, décembre 15). *When Density Isn't Greener*. Récupérée 7 mai 2018, à partir de https://www.citylab.com/design/2017/12/when-density-isnt-greener/548384/. (Cf. p. 66, 69)

Boisseuil, C. (2018). Les études urbaines en France : une méthodologie sans discipline ? *Environnement Urbain / Urban Environment*, (Volume 13) (cf. p. 43).

Boivin, M. & Tanguay, G. A. (2019). Analysis of the Determinants of Urban Tourism Attractiveness : The Case of Québec City and Bordeaux. *Journal of Destination Marketing & Management*, *11*, 67-79. https://doi.org/10.1016/j.jdmm.2018.11.002 (cf. p. 367)

Bondi, L., Baroffio, L., Güera, D., Bestagini, P., Delp, E. J. & Tubaro, S. (2017). First Steps Toward Camera Model Identification With Convolutional Neural Networks. *IEEE Signal Processing Letters*, *24*(3), 259-263. https://doi.org/10.1109/LSP.2016.2641006 (cf. p. 90)

Bonhomme, C., Commenges, H., Deroubaix, J.-F. & Hieramente, E. (Éd.). (2017). *Dictionnaire Passionnel de La Modélisation Urbaine*. L'Oeil d'or. Récupérée 27 février 2018, à partir de http://www.loeildorenligne.com/collection-architecture-et-urbanisme/105-dictionnaire-passionnel-de-la-modelisation-urbaine-9782913661844.html. (Cf. p. 79)

Bonhomme, M. (2013, décembre 11). *Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine* (Thèse de doctorat). Université de Toulouse. Récupérée 11 octobre 2017, à partir de http://lra.toulouse.archi.fr/lra/productions/theses-et-hdr-soutenues/theses-soutenues/Marion_Bonhomme/memoire_v10. (Cf. p. 20, 21, 43, 64, 66, 67, 107, 110, 125, 136, 137, 142, 143, 314)

Bonhomme, M., Haddou, H. A. & Adolphe, L. (2012). Genius : A Tool for Classifying and Modelling Evolution of Urban Typologies. *Proceedings - 28th*

International PLEA Conference on Sustainable Architecture + Urban Design : Opportunities, Limits and Needs - Towards an Environmentally Responsible Architecture, PLEA 2012 (cf. p. 22, 69, 70, 107, 143).

Bordeaux Métropole. (2019, février). *Enquête Mobilité Ménages 2017 - Les principaux résultats*. Bordeaux Métropole. Bordeaux. Récupérée 30 avril 2019, à partir de https://www.bordeaux-metropole.fr/var/bdxmetro/storage/original/application/ac86e87708517be8a5a2e6796a43d402.pdf. (Cf. p. 177, 192)

Boubault, A., Kang, S. & Maïzi, N. (2019). Closing the TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR) Raw Materials Gap with Life Cycle Inventories. *Journal of Industrial Ecology*, *23*(3), 587-600. https://doi.org/10.1111/jiec.12780 (cf. p. 194)

Boucher, I., Fontaine, N., Québec (Province), régions et de l'occupation du territoire Ministère des affaires municipales, d. & Unité ministérielle de recherche et de veille. (2013). *L'aménagement et l'écomobilité : guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable*. (Cf. p. 138, 139).

Boughriet, R. (2020). L'Ademe ouvre ses données sur les diagnostics de performance énergétique. (Cf. p. 136).

Bourdin, A. (2008a). Gentrification : un « concept » à déconstruire. *Espaces et sociétés*, (132-133), 23-37. https://doi.org/10.3917/esp.132.0023 (cf. p. 57-59, 62)

Bourdin, A. (2008b). Un sociologue au pays des aménageurs. S'organiser pour se comprendre. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, *104*(1), 157-163. https://doi.org/10.3406/aru.2008.2751 (cf. p. 2)

Bourdin, A. & Idt, J. (2016). *L'urbanisme des modèles : références, benchmarking et bonnes pratiques*. Editions de l'Aube. (Cf. p. 74, 75)
OCLC : 960903353.

Boyd, D. & Crawford, K. (2012). Six provocations à propos des big data. In P. Mounier (Éd.), *Read/Write Book 2 : Une introduction aux humanités numériques* (p. 197-219). OpenEdition Press. (Cf. p. 40, 90).

Boyko, C. (2014). Misunderstanding density : Why we are building the wrong sort of cities [newspaper]. *The Guardian : Housing Network*. Récupérée 7 mai 2018, à partir de http://www.theguardian.com/housing-network/2014/jul/29/cities-density-building (cf. p. 66)

Brausch, G. (2016). CIAM / Le Corbusier, la charte d'Athènes. *Dérivations : pour le Débat Urbain*, (3) (cf. p. 63, 84).

Brems, M. (2019). A One-Stop Shop for Principal Component Analysis. (Cf. p. 394).

Briens, F. (2015). *La Décroissance au prisme de la modélisation prospective : Exploration macroéconomique d'une alternative paradigmatique* (thèse de doct.). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. (Cf. p. 82).

Broad, G. M. (2013). Robert W. McChesney, Digital Disconnect : How Capitalism Is Turning the Internet Against Democracy, 4 (cf. p. 42).

Brooks, F. (2020). Bergson - Intelligence et Intuition. (Cf. p. 43).

Broulard, L. (2020). « La résilience naît de la communauté » - Kigali, Pudence Rubingisa. *Le Monde* (cf. p. 43).

Brun, C. & Condis, S. (2018). Le palmarès 2018 des villes de France les plus attractives pour le business. (Cf. p. 370).

BUILD_ME. (2020). Building Typology Database - BUILD_ME. (Cf. p. 106).

Bulkeley, H., Edwards, G. A. S. & Fuller, S. (2014). Contesting Climate Justice in the City : Examining Politics and Practice in Urban Climate Change Experiments. *Global Environmental Change*, *25*, 31-40. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.01.009 (cf. p. 26)

Burbage, F. (2013). L'invention du développement durable-soutenable. Des équivoques constitutives. *Philosophies*, 25-52. Récupérée 1 octobre 2020, à partir de https://www.cairn.info/philosophie-du-developpement-durable--9782130592020-page-25.htm (cf. p. 32)

C40. (2016). 2018 Cities and Climate Change Science Conference Announced at COP22. (Cf. p. 17).

C40 Cities. (2018a). *Consumption-Based GHG Emissions of C40 Cities* (rapp. tech.). C40 Cities. (Cf. p. 18).

C40 Cities. (2018b, mars). *Consumption-based GHG emissions of c40 cities*. C40 Cities. Récupérée 19 avril 2018, à partir de http://www.c40.org/researches/consumption-based-emissions. (Cf. p. 29)

C40 Cities & McKinsey Center for Business and Environment. (2014, novembre). *Focused acceleration : A strategic approach to climate action in cities to 2030*. C40 Cities. Récupérée 19 avril 2018, à partir de http://www.c40.org/researches/mckinsey-center-for-business-and-environment. (Cf. p. 29)

Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G. & Castell, A. (2014). Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Energy Analysis (LCEA) of Buildings and the Building Sector : A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *29*, 394-416. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037 (cf. p. 81)

Caglioni, M. (2019). Smart City : un changement de perspective. *Smart City. Une autre lecture dans la ville* (Editions Ovadia, p. 61-83). (Cf. p. 41, 93, 94, 181).

Canovas, A. (2018). Le BIM, révolution technologique ou culturelle ? - mc2i : Conseil en transformation numérique. (Cf. p. 98).

Cantelli, A., Monti, P. & Leuzzi, G. (2015). Numerical Study of the Urban Geometrical Representation Impact in a Surface Energy Budget Model. *Environmental Fluid Mechanics*, *15*(2), 251-273. https://doi.org/10.1007/s10652-013-9309-0 (cf. p. 22)

Cantié, V. (2018). Donald Trump, un climato-sceptique à la tête du pays le plus pollueur au monde. *FranceInter.fr* (cf. p. 29).

Caputo, P., Costa, G. & Ferrari, S. (2013). A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Energy Policy*, *55*, 261-270. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.006 (cf. p. 117, 132, 133, 135, 136, 143)

Caray, J. & Terseur, B. (2018). *Un million d'habitants vivent en zone inondable - Insee Analyses Provence-Alpes-Côte d'Azur - 65* (Insee Analyses Provence-Alpes-Côte d'Azur N° 65). INSEE, DREAL. (Cf. p. 19).

Carcolse, E. (2014). Smart City : partenariat entre IBM et Montpellier. (Cf. p. 41).

Cariolet, J.-M., Colombert, M., Vuillet, M. & Diab, Y. (2018). Assessing the Resilience of Urban Areas to Traffic-Related Air Pollution : Application in Greater Paris. *Science of The Total Environment*, *615*, 588-596. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.334 (cf. p. 60)

Carlson, T. N. & Traci Arthur, S. (2000). The impact of land use — land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology : A satellite perspective. *Global and Planetary Change*, *25*(1), 49-65. https://doi.org/10.1016/S0921-8181(00)00021-7 (cf. p. 90)

Carranza, M. L., Acosta, A. & Ricotta, C. (2007). Analyzing Landscape Diversity in Time : The Use of Rènyi's Generalized Entropy Function. *Ecological Indicators*, *7*(3), 505-510. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.05.005 (cf. p. 131)

Carriou, C. & Ratouis, O. (2014). Quels modèles pour l'urbanisme durable ? *Métropolitiques*. Récupérée 5 octobre 2020, à partir de https://metropolitiques.eu/Quels-modeles-pour-l-urbanisme.html (cf. p. 74)

Casselman, B. (2015). Katrina Washed Away New Orleans's Black Middle Class. (Cf. p. 26).

Caumel, C. (2020). The Covid-19 Crisis as a Metric for Triggering Energy Transition : Elements for Scenarios. (Cf. p. 69).

Cauvert, M. (2015). *Une pauvreté plus prégnante en milieu rural qu'en périphérie des grandes villes - Insee Flash Auvergne - 10* (INSEE-Flash N° 10). INSEE. Auvergne. (Cf. p. 27).

Cayla, J.-M. (2011). *Les Ménages Sous La Contrainte Carbone : Exercice de Modélisation Prospective Des Secteurs Résidentiel et Transports Avec TIMES* (Theses). École Nationale Supérieure des Mines de Paris. (Cf. p. 193, 200).

CCNUCC. (2018). Qu'est-Ce Que l'Accord de Paris ? (Cf. p. 19).

CE Delft, Doll, C. & van Essen, H. (2008, avril). *Road infrastructure cost and revenue in Europe* (Rendu intermédiaire N° 08.4288.17). CE Delft. Delft. Récupérée 18 septembre 2018, à partir de https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/sustainable/studies/doc/2008_road_infrastructure_costs_and_revenues.pdf. (Cf. p. 200)

Cegielska, K., Kukulska-Kozieł, A., Salata, T., Piotrowski, P. & Szylar, M. (2019). Shannon Entropy as a Peri-Urban Landscape Metric : Concentration of Anthropogenic Land Cover Element. *Journal of Spatial Science*, *64*(3), 469-489. https://doi.org/10.1080/14498596.2018.1482803 (cf. p. 131)

Centre de recherche sur les transports & OCDE. (2005, août 3). *Évaluation économique des chaussées à longue durée de vie*. Récupérée 18 septembre 2018, à partir de https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/05pavementifr.pdf. (Cf. p. 200)

Cerezo, C., Sokol, J., AlKhaled, S., Reinhart, C., Al-Mumin, A. & Hajiah, A. (2017). Comparison of four building archetype characterization methods in urban building energy modeling (UBEM) : A residential case study in Kuwait City. *Energy and Buildings*, *154*, 321-334. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.029 (cf. p. 107, 133, 135, 136, 143)

Chancel, L., Alvaredo, F., Piketty, T., Saez, E. & Zucman, G. (2018). *Rapport sur les inégalités mondiales* (Synthèse). Laboratoire sur les inégalités mondiales. (Cf. p. 1).

Chassard, M. & René, Y. (2016). *Les territoires ruraux isolés et les bassins de vie de certains pôles urbains davantage exposés à la pauvreté - Insee Analyses Bourgogne-Franche-Comté - 2* (INSEE-Analyses N° 2). INSEE. Bourgogne-Franche-Comté. (Cf. p. 27).

Chen, Y., Quan, J., Zhan, W. & Guo, Z. (2016). Enhanced Statistical Estimation of Air Temperature Incorporating Nighttime Light Data. *Remote Sensing*, *8*(8), 656. https://doi.org/10.3390/rs8080656 (cf. p. 214)

Cherki, Marc. (2018). Climat : seulement 16 pays appliquent réellement l'accord de Paris. *Le Figaro.fr* (cf. p. 19).

Cheshire, P. (1999). Cities in Competition : Articulating the Gains from Integration. *Urban Studies*, *36*(5-6), 843-864. https://doi.org/10.1080/0042098993240 (cf. p. 367, 368)

Chiodi, A., Gargiulo, M., Rogan, F., Deane, J. P., Lavigne, D., Rout, U. K. & Ó Gallachóir, B. P. (2013). Modelling the Impacts of Challenging 2050 European Climate Mitigation Targets on Ireland's Energy System. *Energy Policy*, *53*, 169-189. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.045 (cf. p. 82)

Choay, F. (1979). *L'urbanisme : utopies et réalités - une anthologie*. Éditions du Soleil. (Cf. p. 30, 46, 74)
OCLC : 837617783.

Choay, F. (2006). *L'urbanisme : utopies et réalités - une anthologie* [OCLC : 837617783]. Éditions du Soleil. (Cf. p. 110).

Choi, I. Y., Cho, S. H. & Kim, J. T. (2012). Energy Consumption Characteristics of High-Rise Apartment Buildings According to Building Shape and Mixed-Use Development. *Energy and Buildings*, *46*, 123-131. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.038 (cf. p. 201)

Christen, A., van der Laan, M., Kellett, R. & Tooke, R. (2012). Context Sensitive Scaling of Energy Use Simulations From Individual Buildings to Cities (cf. p. 106, 107, 132, 133).

Ciccone, A. & Hall, R. E. (1993, avril). *Productivity and the Density of Economic Activity* (Working Paper N° 4313). National Bureau of Economic Research. https://doi.org/10.3386/w4313. (Cf. p. 66)

Cionco, R. M. & Ellefsen, R. (1998). High Resolution Urban Morphology Data for Urban Wind Flow Modeling. *Atmospheric Environment*, *32*(1), 7-17. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00274-4 (cf. p. 107)

Citizing & OpenCitiz. (2017, novembre). *Smart City : gadget ou création de valeur collective ? L'évaluation socio-économique appliquée à la ville intelligente à travers cinq études de cas*. Caisse des Dépôts, Syntec Numérique, Advancity et Systematic Paris-Région. Récupérée 1 octobre 2020, à partir de https://www.citizing-consulting.com/wp-content/uploads/Smart-city-Gadget-ou-creation-de-valeur-collective.pdf. (Cf. p. 39)

Clark, C. (1951). Urban Population Densities. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, *114*(4), 490-496. https://doi.org/10.2307/2981088 (cf. p. 2)

Clarke, K. C. & Gaydos, L. J. (1998). Loose-Coupling a Cellular Automaton Model and GIS : Long-Term Urban Growth Prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, *12*(7), 699-714. https://doi.org/10.1080/136588198241617 (cf. p. 79)

Clozel, A. (2011). SIG et Urbanisme : Des Liens Naturels et Anciens » Le Blog SIG & URBA. (Cf. p. 99, 100).

Clozel, A. (2019). Valeurs Foncières En Opendata, Hourra ! (Cf. p. 98).

Club Ville Aménagement. (2020). « Pour lutter contre l'artificialisation des sols, il faut accorder un bonus financier ou fiscal aux opérations vertueuses ». *Le Monde.fr* (cf. p. 268).

CNESCO. (2016). *Comment l'école amplifie-t-elle les inégalités sociales et migratoires ?* (Dossier de synthèse). CNESCO. (Cf. p. 25).

CNIL. (2018, mars 27). DIRECT ENERGIE : mise en demeure pour une absence de consentement concernant les données issues du compteur communicant LINKY. Récupérée 2 mai 2018, à partir de https://www.cnil.fr/fr/direct-

energie-mise-en-demeure-pour-une-absence-de-consentement-concernant-les-donnees-issues-du. (Cf. p. 76)

Cohen, D. A. (2018). *Climate Justice and the Right to the City* (rapp. tech.). PennIUR, Kleinman Center for Energy Policy, Perry World House. (Cf. p. 25, 26).

Coletto, C. (2017). Réinventer La Commercialisation d'un Logement Neuf. (Cf. p. 59).

Coletto, C. (2019). Opération 50000 Logements Neufs à Bordeaux : Où En Est-On ? (Cf. p. 14).

Collectif Champ Libre. (2018). Quelle place pour la théorie dans le champ de l'aménagement et de l'urbanisme en France ? *Environnement Urbain / Urban Environment*, (Volume 13) (cf. p. 2, 50).

Commissariat général au développement durable. (2018). *Théma - Objectif zéro artificialisation nette.pdf* (Essentiel). CGDD / Ministère de la transition écologique et solidaire. (Cf. p. 268).

Comte-Sponville, A. (2010). *Le Goût de Vivre : Et Cent Autres Propos*. Albin Michel. (Cf. p. 45).

Copernicus. (2018). CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service. (Cf. p. 115).

Corburn, J. (2007). Reconnecting with Our Roots : American Urban Planning and Public Health in the Twenty-First Century. *Urban Affairs Review*, *42*(5), 688-713. https://doi.org/10.1177/1078087406296390 (cf. p. 14, 60)

Cossardeaux, J. & Hiault, R. (2015). COP21 : les 10 points clefs d'une négociation historique. *Les Echos* (cf. p. 19).

Coulton, C. J., Korbin, J., Chan, T. & Su, M. (2001). Mapping Residents' Perceptions of Neighborhood Boundaries : A Methodological Note. *American Journal of Community Psychology*, *29*(2), 371-383. https://doi.org/10.1023/A:1010303419034 (cf. p. 95)

Cour des comptes. (2015). Les Partenariats Public-Privé Des Collectivités Territoriales : Des Risques à Maîtriser. *Rapport Public Annuel 2015*. (Cf. p. 55).

Courgnaud, M. (2018). Construire son smart territoire, intelligemment [magazine]. *La Gazette des Communes*. Récupérée 17 juin 2019, à partir de https://www.lagazettedescommunes.com/564980/construire-son-smart-territoire-intelligemment/ (cf. p. 38)

Crépon, E. & Monteils, J.-F. (2012). Circulaire du 3 février 2012 relative au respect des modalités de calcul de la surface de plancher des constructions définie par le livre I du code de l'urbanism. (Cf. p. 200).

CUB, BVA & A'Urba. (2009). *Enquête Ménages Déplacements réalisée dans l'agglomération Bordelaise en 2008-2009* (rapp. tech.). (Cf. p. 177, 188, 190-192).

Curtis, W. J. R. (2008). Les excès du star system : le Projet Triangle de Herzog (cf. p. 202).

Dadoun, C. (2014). *La pauvreté en Languedoc-Roussillon : à territoires différents, fragilités différentes - Insee Analyses Languedoc-Roussillon - 5* (INSEE-Analyses N° 5). INSEE. Languedoc-Roussillon. (Cf. p. 27).

Daly, H. E., Ramea, K., Chiodi, A., Yeh, S., Gargiulo, M. & Gallachóir, B. Ó. (2014). Incorporating Travel Behaviour and Travel Time into TIMES Energy System Models. *Applied Energy*, *135*, 429-439. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.051 (cf. p. 184, 188, 191)

Damasio, A. (2019). *Les furtifs*. (Cf. p. 94).

Damgé, M. (2017). Les inégalités dans le monde, en hausse depuis quarante ans. *Le Monde.fr* (cf. p. 24).

Daniel, M., Lemonsu, A. & Viguié, V. (2018). Role of Watering Practices in Large-Scale Urban Planning Strategies to Face the Heat-Wave Risk in Future Climate. *Urban Climate*, *23*, 287-308. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.001 (cf. p. 215)

Danielaini, T. T., Maheshwari, B. & Hagare, D. (2017). Defining Rural–Urban Interfaces for Understanding Ecohydrological Processes in West Java, Indonesia : Part I. Development of Methodology to Delineate Peri-Urban Areas. *Ecohydrology & Hydrobiology*. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.11.006 (cf. p. 128, 142, 143)

Daubigny, J. & Lorot, P. (2013). Le Grand Paris dans la compétition des grandes métropoles. *Geoeconomie*, *n° 66*(3), 167-176 (cf. p. 368, 370).

de Jacquelot, V., Le Roux, D., N'haux, E. & Pichevin, J.-P. (2001). Aménagement urbain. *Le Moniteur* (cf. p. 49).

de la Cohésion des territoires, M. (2016, juillet 27). *Coût de la construction - Ministère de la Cohésion des territoires* (Rapport définitif). Conseil supérieur de la construction et de l'efficacité énergétique. Récupérée 27 mars 2018, à partir de http://www.cohesion-territoires.gouv.fr/cout-de-la-construction. (Cf. p. 199)

De Miglio, R., Chiodi, A. & Gargiulo, M. (2016a, octobre). *Report on optimum sustainability pathways - Cesena* (Deliverable N° D5.4). E4SMA. Récupérée 24 octobre 2017, à partir de http://www.insmartenergy.com/wp-content/uploads/2014/12/D5.4-Optimum-Sustainable-Pathways-Cesena.pdf. (Cf. p. 142)

De Miglio, R., Chiodi, A. & Gargiulo, M. (2016b, octobre). *Report on optimum sustainability pathways - cesena* (Deliverable N° D5.4). E4SMA. Récupérée 24 octobre 2017, à partir de http://www.insmartenergy.com/wp-content/uploads/2014/12/D5.4-Optimum-Sustainable-Pathways-Cesena.pdf. (Cf. p. 128, 132, 136)

de Munck, C., Lemonsu, A., Masson, V., Le Bras, J. & Bonhomme, M. (2017). Evaluating the Impacts of Greening Scenarios on Thermal Comfort and Energy and Water Consumptions for Adapting Paris City to Climate Change. *Urban Climate*. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.01.003 (cf. p. 1, 77, 81, 215, 311)

Debolini, M., Valette, E., François, M. & Chéry, J.-P. (2015). Mapping Land Use Competition in the Rural–Urban Fringe and Future Perspectives on Land Policies : A Case Study of Meknès (Morocco). *Land Use Policy*, *47*, 373-381. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.035 (cf. p. 180)

Debray, C. (2015). Avec la Cité du vin, Bordeaux tient-elle son "effet Guggenheim"? *SudOuest* (cf. p. 201).

Decrop, G. (2008). Un statut de réfugié environnemental est-il une réponse pertinente aux effets sociaux du réchauffement climatique? *Revue Asylon(s)*, (6) (cf. p. 252).

Degioanni, J.-F. & Albert, M.-D. (2012). La mixité des usages, une valeur montante... *Le Moniteur* (cf. p. 186).

Degraeuwe, B., Thunis, P., Clappier, A., Weiss, M., Lefebvre, W., Janssen, S. & Vranckx, S. (2017). Impact of Passenger Car NOX Emissions on Urban NO2 Pollution – Scenario Analysis for 8 European Cities. *Atmospheric Environment*, *171*, 330-337. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.040 (cf. p. 10)

Deilami, K., Kamruzzaman, M. & Liu, Y. (2018). Urban Heat Island Effect : A Systematic Review of Spatio-Temporal Factors, Data, Methods, and Mitigation Measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *67*, 30-42. https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009 (cf. p. 20)

Déjean, J.-P. (2019). Bordeaux Métropole : 50.000 logements "désirables" et pas chers (Bordeaux). *La Tribune* (cf. p. 14).

Delmastro, C., Mutani, G. & Schranz, L. (2016). The evaluation of buildings energy consumption and the optimization of district heating networks : A GIS-based model. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, *7*(3), 343-351. https://doi.org/10.1007/s40095-015-0161-5 (cf. p. 107, 135, 138)

Dempsey, C. (2012). History of GIS - GIS Lounge. (Cf. p. 97).

Dempsey, C. (2014). GIS Timeline. (Cf. p. 97).

Deniau, K. (2020). Pourquoi Google Abandonne Son Projet de Smart City à Toronto. (Cf. p. 41, 42).

Depraz, S. (2017, janvier). Écoumène (ou œkoumène). *Géoconfluences*. Récupérée 29 septembre 2020, à partir de http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/ecoumene. (Cf. p. 114)

Descombes, M. (2019). L'architecture modulaire, un atout pour le futur ? *Le Temps* (cf. p. 310).

Dijkstra, L., Maseland, J., Kommission, E. & Centre for Human Settlements (Éd.). (2016). *The State of European Cities 2016 : Cities Leading the Way to a Better Future*. Publications Office of the European Union. (Cf. p. 1, 18, 19, 28, 29, 139)
OCLC : 992765952.

DILA. (2018). Comment les lois de 2014 et de 2017 ont réformé les métropoles. (Cf. p. 10).

Din, A., Dubois, A., Fragniere, E., Kanala, R., Sella, M. A. & Haurie, A. (1998). Energy/Environment Models and GIS : MARKAL-Geneva goes GIS !, 79-107. Récupérée 20 novembre 2017, à partir de https://archive-ouverte.unige.ch/unige:75529 (cf. p. 79)

Dodds, P. E. & McDowall, W. (2014). Methodologies for Representing the Road Transport Sector in Energy System Models. *International Journal of Hydrogen Energy*, *39*(5), 2345-2358. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.11.021 (cf. p. 188)

Dong, Y., Su, H., Zhu, J. & Zhang, B. (2017). Improving Interpretability of Deep Neural Networks With Semantic Information, 4306-4314. Récupérée 28 septembre 2020, à partir de https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017/html/Dong_Improving_Interpretability_of_CVPR_2017_paper.html (cf. p. 91)

Doudard, R. (2018). *Flexibilité et Interactions de Long Terme Dans Les Systèmes Multi-Énergies : Analyse Technico-Économique Des Nouvelles Filières Gazières et Électriques En France* (These de Doctorat). Paris Sciences et Lettres (ComUE). (Cf. p. 318).

Douillard, R. (2017). *Analyse des différentes pratiques en matière de mutualisation et foisonnement des stationnements* (other). AGEIS, 3 rue de la Planchonnais, 44980 Sainte-Luce-sur-Loire. (Cf. p. 40, 41, 43).

Dsouza, J. (2020). What Is a GPU and Do You Need One in Deep Learning ? (Cf. p. 89).

Du, P., Wood, A. & Stephens, B. (2016). Empirical Operational Energy Analysis of Downtown High-Rise vs. Suburban Low-Rise Lifestyles : A Chicago Case Study. *Energies*, *9*(6), 445. https://doi.org/10.3390/en9060445 (cf. p. 69, 201)

Dubois, C., Cloutier, G., Rynning, M. K., Adolphe, L. & Bonhomme, M. (2016). City and Building Designers, and Climate Adaptation. *Buildings*, *6*, 28. https://doi.org/10.3390/buildings6030028 (cf. p. 2, 98, 99)

Duffé, J. (2017). Le « cinéma de demain » ouvrira dans deux ans à Voltaire [newspaper]. *leparisien.fr : /paris-75/paris-75011/*. Récupérée 6 octobre 2020, à partir de https://www.leparisien.fr/paris-75/paris-75011/le-cinema-de-demain-ouvrira-dans-deux-ans-a-voltaire-03-01-2017-6521562.php (cf. p. 186)

Dumartin, F. (2019). La mixité pour sauver l'homme, son quartier et sa ville ? (Cf. p. 186).

Durr, J.-M. (2005). The French New Rolling Census. *Statistical Journal of the United Nations Economic Commission for Europe*, *22*(1), 3-12. https://doi.org/10.3233/SJU-2005-22102 (cf. p. 116)

Duru-Bellat, M. (2015). *Les inégalités sociales à l'école : Genèse et mythes*. Presses Universitaires de France. (Cf. p. 25).

Duru-Bellat, M. & Kieffer, A. (2008). Du baccalauréat à l'enseignement supérieur en France : déplacement et recomposition des inégalités. *Population*, *Vol. 63*(1), 123-157 (cf. p. 25).

Eilenberger, W. & Gepner, C. (2019). *Le temps des magiciens : 1919-1929, l'invention de la pensée moderne*. (Cf. p. 313)
OCLC : 1126257078.

Emelianoff, C. (1999). Comment Définir Une Ville Durable ? *CITEGO* (cf. p. 33-35, 37).

Emelianoff, C. (2004). L'urbanisme durable en Europe : à quel prix ? *Ecologie & politique*, *29*(2), 21. https://doi.org/10.3917/ecopo.029.0021 (cf. p. 17, 30, 35-37, 92, 369)

Emelianoff, C. (2007a). La ville durable : l'hypothèse d'un tournant urbanistique en Europe, The sustainable city : a turning-point in european urban planning ? *L'Information géographique*, *71*(3), 48-65. https://doi.org/10.3917/lig.713.0048 (cf. p. 36, 309)

Emelianoff, C. (2007b). La ville durable : l'hypothèse d'un tournant urbanistique en Europe, The sustainable city : a turning-point in european urban planning ? *L'Information géographique*, *71*(3), 48-65. https://doi.org/10.3917/lig.713.0048 (cf. p. 72, 114)

Emelianoff, C. (2015). *La ville durable, une notion fossile ?* Éditions Quæ. (Cf. p. 33, 34, 36, 41).

Engel-Yan, J., Kennedy, C., Saiz, S. & Pressnail, K. (2005). Toward Sustainable Neighbourhoods : The Need to Consider Infrastructure Interactions. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *32*(1), 45-57. https://doi.org/10.1139/l04-116 (cf. p. 77)

Engler, A. C. (2015, juillet 21). *The future of social science research : A data science perspective*. Récupérée 3 mai 2018, à partir de https://www.urban.org/urban-wire/future-social-science-research-data-science-perspective. (Cf. p. 79)

Errard, G. (2019). Découvrez le prix des biens vendus depuis 5 ans dans votre quartier. *Le Figaro Immobilier* (cf. p. 98).

Estèbe, P. (2016). L'aménagement Du Territoire Peut-Il Être Démocratique ? *L'annuel de l'IHEDATE*, (2) (cf. p. 50, 57).

Exner, D., D'Alonzo, V., Paoletti, G., Pascual, R. & Pernetti, R. (2017). Building-Stock Analysis for the Definition of an Energy Renovation Scenario on the Urban Scale. In A. Bisello, D. Vettorato, R. Stephens & P. Elisei (Éd.), *Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions : Results of SSPCR 2015* (p. 33-54). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44899-2_3. (Cf. p. 106, 107)

Ezziane, Z. (2006). Applications of artificial intelligence in bioinformatics : A review. *Expert Systems with Applications*, *30*(1), 2-10. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.09.042 (cf. p. 90)

Fabre, M. (2020). L'artificialisation des sols repart à la hausse, malgré les annonces d'Emmanuel Macron. (Cf. p. 268).

Faburel, G. (2014). La mise en politique du développement durable : vers un « nouveau » modèle d'action par les pratiques professionnelles ? *Métropolitiques*. Récupérée 5 octobre 2020, à partir de https://metropolitiques.eu/La-mise-en-politique-du.html (cf. p. 75)

Famuyibo, A. A., Duffy, A. & Strachan, P. (2012). Developing Archetypes for Domestic Dwellings—An Irish Case Study. *Energy and Buildings*, *50*, 150-157. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.033 (cf. p. 106)

Farigoul, S. (2015). Objectif 11 : Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables. (Cf. p. 25).

Favriau, M. (2019). Urbanisme et collapsologie : saisir la perspective de l'effondrement pour penser les territoires de demain. (Cf. p. 15).

Fedra, K. & Haurie, A. (1999). A Decision Support System for Air Quality Management Combining GIS and Optimisation Techniques. *International Journal of Environment and Pollution*, *12*(2-3), 125-146. https://doi.org/10.1504/IJEP.1999.002288 (cf. p. 100)

Fedra, K., Haurie, A. & Kanala, R. (2000). Integrated Decision Support System for Air Quality Management, 6 (cf. p. 100, 101).

Fellmann, T. & Morel, B. (1991). Territoires en action. Prospective urbaine et planification stratégique. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, *51*(1), 93-102. https://doi.org/10.3406/aru.1991.1603 (cf. p. 80)

Filogamo, L., Peri, G., Rizzo, G. & Giaccone, A. (2014). On the Classification of Large Residential Buildings Stocks by Sample Typologies for Energy Planning Purposes. *Applied Energy*, *135*, 825-835. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.002 (cf. p. 107)

Fisher, P. & Peters, A. (1998). Industrial Incentives : Competition Among American States and Cities. *Upjohn Press*. https://doi.org/10.17848/9780585308401 (cf. p. 368)

Florida, R. (2012, avril 19). *Why Bigger Cities Are Greener*. Récupérée 7 mai 2018, à partir de https://www.citylab.com/life/2012/04/why-bigger-cities-are-greener/863/. (Cf. p. 66)

Fonseca, J. A. & Schlueter, A. (2015). Integrated Model for Characterization of Spatiotemporal Building Energy Consumption Patterns in Neighborhoods and City Districts. *Applied Energy*, *142*, 247-265. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.068 (cf. p. 79, 101, 121)

Fontaine, C. M. & Rounsevell, M. D. A. (2009). An Agent-Based Approach to Model Future Residential Pressure on a Regional Landscape. *Landscape*

Ecology, *24*(9), 1237. https://doi.org/10.1007/s10980-009-9378-0 (cf. p. 77, 101)

Fosse, J. (2019). *Objectif « Zéro artificialisation nette» : quels leviers pour protéger les sols ?* (Rapport au ministre de la Transition écologique et solidaire, au ministre de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales et au ministre chargé de la Ville et du logement). France Stratégie. Paris. (Cf. p. 267).

Fourcade, A. & Khonsari, R. H. (2019). Deep learning in medical image analysis : A third eye for doctors. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*, *120*(4), 279-288. https://doi.org/10.1016/j.jormas.2019.06.002 (cf. p. 90)

Føyn, T. H. Y., Karlsson, K., Balyk, O. & Grohnheit, P. E. (2011). A Global Renewable Energy System : A Modelling Exercise in ETSAP/TIAM. *Applied Energy*, *88*(2), 526-534. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.003 (cf. p. 82)

Fragniere, E., Haurie, A. & Kanala, R. (1999). A GIS–Based Regional Energy–Environment Policy Model. *International Journal of Global Energy Issues*, *12*(1-6), 159-167. https://doi.org/10.1504/IJGEI.1999.000830 (cf. p. 79)

France, P. (2013). Open Data : Strasbourg ouvre 64 jeux de données. (Cf. p. 99).

Frank, L. D. & Engelke, P. O. (2001). The Built Environment and Human Activity Patterns : Exploring the Impacts of Urban Form on Public Health. *Journal of Planning Literature*, *16*(2), 202-218. https://doi.org/10.1177/08854120122093339 (cf. p. 10)

Frayssinet, L., Merlier, L., Kuznik, F., Hubert, J.-L., Milliez, M. & Roux, J.-J. (2017). Modeling the Heating and Cooling Energy Demand of Urban Buildings at City Scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.040 (cf. p. 79)

Fressoz, J.-B. (2014). Pour Une Histoire Désorientée de l'énergie. In D. Thevenot (Éd.), *25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement - L'économie Verte En Question*. (Cf. p. 16, 153).

Friedman, J. H., Hastie, T. & Tibshirani, R. (2010). Regularization Paths for Generalized Linear Models via Coordinate Descent. *Journal of Statistical Software*, *33*(1), 1-22. https://doi.org/10.18637/jss.v033.i01 (cf. p. 129)

Frioux, S. (2010). Geneviève Massard-Guilbaud, Histoire de la pollution industrielle. France, 1789-1914, Paris, Éditions de l'EHESS, 2010, 404 p., ISBN 978-2-7132-2237-5. *Revue dhistoire moderne contemporaine*, *n° 57-3*(3), 173-175 (cf. p. 10).

Frumkin, H. (2002). Urban Sprawl and Public Health. *Public Health Reports*, *117*(3), 201-217. https://doi.org/10.1093/phr/117.3.201 (cf. p. 14, 60, 139)

Funk, K. & Deininger, N. (2018, août 20). *Five Innovative Examples of Smart Cities in the U.S. | Bipartisan Policy Center*. Récupérée 25 septembre 2020, à partir de https://bipartisanpolicy.org/blog/five-innovative-examples-of-smart-cities-in-the-u-s/. (Cf. p. 38, 39)

Fussell, E., Sastry, N. & VanLandingham, M. (2010). Race, Socioeconomic Status, and Return Migration to New Orleans after Hurricane Katrina. *Population and environment*, *31*(1-3), 20-42. https://doi.org/10.1007/s11111-009-0092-2 (cf. p. 26)

Füzesséry, S. (2010). Réinventer l'urbanisme - Alain Bourdin. (Cf. p. 2, 34, 58, 59, 61).

Gadsden, S., Rylatt, M., Lomas, K. & Robinson, D. (2003). Predicting the urban solar fraction : a methodology for energy advisers and planners

based on GIS. *Energy and Buildings*, *35*(1), 37-48. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00078-6 (cf. p. 107)

Gairaud, M.-A. (2020). A Paris, la rue de Rivoli devrait être interdite aux automobilistes pour le déconfinement (Le Parisien). *leparisien.fr* (cf. p. 191).

Galio, P. (2018). Impact de Notre Consommation Sur l'environnement, Une Vaste Étude Fait Le Point. *The Conversation* (cf. p. 17).

Gall, J., Stoll, C., de Aguiar, E., Theobalt, C., Rosenhahn, B. & Seidel, H.-P. (2009). Motion Capture Using Joint Skeleton Tracking and Surface Estimation. *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1746-1753. https://doi.org/10.1109/CVPR.2009.5206755 (cf. p. 90)

Gallez, C. (2002). Indicateurs de Comparaison de Scenarios Prospectifs Peut-on Elargir Le Debat Sur 1' Avenir de La Mobilite Urbaine ? *Recherche - Transports - Sécurité*, *77*, 281-295. https://doi.org/10.1016/S0761-8980(02)90004-X (cf. p. 80)

Gandy, M. (1999). The Paris Sewers and the Rationalization of Urban Space. *Transactions of the Institute of British Geographers*, *24*(1), 23-44. https://doi.org/10.1111/j.0020-2754.1999.00023.x (cf. p. 10)

Gao, Z., Kii, M., Nonomura, A. & Nakamura, K. (2017). Urban expansion using remote-sensing data and a monocentric urban model. *Computers, Environment and Urban Systems*. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.002 (cf. p. 90)

Gargiulo, M. (2016). An Integrated Planning Framework for the Development of Sustainable and Resilient Cities - The Case of the InSMARTproject. (Cf. p. 82).

Geneletti, D., La Rosa, D., Spyra, M. & Cortinovis, C. (2017). A Review of Approaches and Challenges for Sustainable Planning in Urban Peripheries. *Landscape and Urban Planning*, *165*, 231-243. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.01.013 (cf. p. 43, 81)

Géoconfluences. (2013). Périurbain. *Géoconfluences* (cf. p. 66).

Géoconfluences. (2019). Aménagement du territoire, aménagement « des territoires ». *Géoconfluences* (cf. p. 49, 50, 309).

Gerbeau, D. (2014). Les 9 principales dispositions de la loi « métropoles » dans le détail. *La Gazette des Communes* (cf. p. 10).

Gerber, P., Caruso, G., Cornelis, E. & de Chardon, C. M. (2018). A Multi-Scale Fine-Grained LUTI Model to Simulate Land-Use Scenarios in Luxembourg. *Journal of Transport and Land Use*, *11*(1), 255-272 (cf. p. 77).

Geurs, K. T. & van Wee, B. (2004). Land-Use/Transport Interaction Models as Tools for Sustainability Impact Assessment of Transport Investments. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, *4*(3). https://doi.org/10.18757/ejtir.2004.4.3.4272 (cf. p. 77-79)

Gharbi, I. (2016). Infrastructures viaires et discontinuités urbaines : quels remèdes pour une accessibilité meilleure dans le contexte de la ville-région contemporaine ? *Espace populations sociétés. Space populations societies*, (2016/2). https://doi.org/10.4000/eps.6305 (cf. p. 16)

Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H. & Meijers, E. (2007). City-Ranking of European Medium-Sized Cities. *IFHP World Congress - Futures of Cities*, 12 (cf. p. 43).

Giffinger, R. & Gudrun, H. (2010). Smart Cities Ranking : An Effective Instrument for the Positioning of the Cities ? *ACE : Architecture, City and Environment*, *4*(12), 7-26. https://doi.org/10.5821/ace.v4i12.2483 (cf. p. 43)

Gifford, R. (2007). The Consequences of Living in High-Rise Buildings. *Architectural Science Review*, *50*(1), 2-17. https://doi.org/10.3763/asre.2007.5002 (cf. p. 201)
_eprint : https://doi.org/10.3763/asre.2007.5002

Gintrand, F. (2020). Et si on relisait vraiment la Charte d'Athènes ? (Cf. p. 63).

Ginzarly, M., Pereira Roders, A. & Teller, J. (2019). Mapping Historic Urban Landscape Values through Social Media. *Journal of Cultural Heritage*, *36*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.10.002 (cf. p. 90)

Glancey, J. (2015). Skyscrapers : The Race to the Top. (Cf. p. 369).

GlobalData. (2020). History of Smart Cities : Timeline. (Cf. p. 38).

Godoy-Shimizu, D., Steadman, P., Hamilton, I., Donn, M., Evans, S., Moreno, G. & Shayesteh, H. (2018). Energy Use and Height in Office Buildings. *Building Research & Information*, *46*(8), 845-863. https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1479927 (cf. p. 201)
_eprint : https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1479927

Golkar, F., Sabziparvar, A. A., Khanbilvardi, R., Nazemosadat, M. J., Zand-Parsa, S. & Rezaei, Y. (2018). Estimation of Instantaneous Air Temperature Using Remote Sensing Data. *International Journal of Remote Sensing*, *39*(1), 258-275. https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1382743 (cf. p. 214)

Gonçalves, D., Sheikhnejad, Y., Oliveira, M. & Martins, N. (2020). One Step Forward toward Smart City Utopia : Smart Building Energy Management Based on Adaptive Surrogate Modelling. *Energy and Buildings*, *223*, 110146. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110146 (cf. p. 38)

Gonçalves, J., Gomes, M. C., Ezequiel, S., Moreira, F. & Loupa-Ramos, I. (2017). Differentiating Peri-Urban Areas : A Transdisciplinary Approach towards a Typology. *Land Use Policy*, *63*, 331-341. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.01.041 (cf. p. 43, 128, 142, 143)

Gonzalez, P.-L. (2011). L'analyse en composantes principales (A.C.P.) (Cf. p. 119).

Gospodini, Aspa. (2002). European Cities in Competition and the New ' Uses ' of Urban Design. *Journal of Urban Design*, *7*(1), 59-73. https://doi.org/10.1080/13574800220129231 (cf. p. 367-370)
_eprint : https://doi.org/10.1080/13574800220129231

Gougou, F. & Persico, S. (2020). Elections municipales : « Dans la quasi-totalité des cas, les listes à direction EELV se sont imposées en l'absence des maires sortants ». *Le Monde.fr* (cf. p. 11).

Granato, D. & Ares, G. (2014). *Mathematical and Statistical Methods in Food Science and Technology*. John Wiley & Sons. (Cf. p. 90).

Greco, L., Josso, V. & Rio, N. (2018). Les « Réinventer » : un concours de programmation… sans programmiste ? *Métropolitiques*, 5 (cf. p. 58, 59, 61, 62).

Greset, C., Kaiser, L. & Vaillant, A. (2016). *Etude pour la conception d'un îlot urbain optimisé : projet Bâtiville (1)* (rapp. tech. N° 1). Ecole d'architecture de la ville et des territoires. Marne-la-Vallée. (Cf. p. 98).

Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Baik, J.-J., Belcher, S. E., Beringer, J., Bohnenstengel, S. I., Calmet, I., Chen, F., Coutts, A., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M. L., Hamdi, R., Hendry, M., Kanda, M., Kawai, T., Kawamoto, Y., Kondo, H., … Zhang, N. (2011). Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *International Journal of Climatology*, *31*(2), 244-272. https://doi.org/10.1002/joc.2227 (cf. p. 76, 81)

Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Barlow, J., Baik, J.-J., Belcher, S. E., Bohnenstengel, S. I., Calmet, I., Chen, F., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M. L., Hamdi, R., Hendry, M., Kawai, T., Kawamoto, Y., Kondo, H., Krayenhoff, E. S., Lee, S.-H., … Zhang, N. (2010). The International Urban Energy Balance Models Comparison Project : First Results from Phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *49*(6), 1268-1292. https://doi.org/10.1175/2010JAMC2354.1 (cf. p. 76, 81)

Grisot, S. (2019). Peupler les vides : l'urbanisme transitoire vu par Plateau Urbain. (Cf. p. 310).

Groupe Monassier. (2019). La loi ELAN - Evolution du logement, de l'aménagement et du numérique. (Cf. p. 52).

Gudipudi, R., Fluschnik, T., Ros, A. G. C., Walther, C. & Kropp, J. P. (2016). City Density and CO2 Efficiency. *Energy Policy*, *91*, 352-361. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.015 (cf. p. 66)

Guéranger, D. & Poupeau, F.-M. (2007). L'administration parisienne face à la concertation : le cas du Plan local d'urbanisme. *Paris sous l'oeil des chercheurs* (p. 157-167). Belin. (Cf. p. 52).

Guerois, M. & Pumain, D. (2017). Des Tendances de l'urbanisation En France et En Europe. *Sols Artificialisés et Processus d'artificialisation Des Sols : Déterminants, Impacts et Leviers d'action*. (p. 18). INRA. (Cf. p. 1).

Guichard, O. & Bonnet, C. (1973). Circulaire du 21 mars 1973 relative aux formes d'urbanisation dites "grands ensembles" et à la lutte contre la ségrégation sociale par l'habitat. (Cf. p. 133).

Guitton-Boussion, J. (2019). L'Île-de-France va s'effondrer… et la vie y sera belle. (Cf. p. 80).

Güneralp, B., Zhou, Y., Ürge-Vorsatz, D., Gupta, M., Yu, S., Patel, P. L., Fragkias, M., Li, X. & Seto, K. C. (2017). Global scenarios of urban density and its impacts on building energy use through 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(34), 8945-8950. https://doi.org/10.1073/pnas.1606035114 (cf. p. 66)

Hache, E., Leboullenger, D. & Mignon, V. (2017). Beyond average energy consumption in the French residential housing market : A household classification approach. *Energy Policy*, *107*, 82-95. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.038 (cf. p. 138)

Hägerstrand, T. (1970). What About People in Regional Science ? *Papers in Regional Science*, *24*(1), 7-24. https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1970.tb01464.x (cf. p. 2, 77, 79, 188)
_eprint : https://rsaiconnect.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1435-5597.1970.tb01464.x

Hamilton, I., Evans, S., Steadman, P., Godoy-Shimizu, D., Donn, M., Shayesteh, H. & Moreno, G. (2017). All the Way to the Top ! The Energy Implications of Building Tall Cities. *Energy Procedia*, *122*, 493-498. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.302 (cf. p. 116)

Hart, A. & Wyatt, J. (1990). Evaluating Black-Boxes as Medical Decision Aids : Issues Arising from a Study of Neural Networks. *Medical Informatics*, *15*(3), 229-236. https://doi.org/10.3109/14639239009025270 (cf. p. 90)
_eprint : https://doi.org/10.3109/14639239009025270

Harvey, M. & Pilgrim, S. (2011). The New Competition for Land : Food, Energy, and Climate Change. *Food Policy*, *36*, S40-S51. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.009 (cf. p. 180)

Hassan, A. M. & Lee, H. (2015). The Paradox of the Sustainable City : Definitions and Examples. *Environment, Development and Sustainability*, *17*(6), 1267-1285. https://doi.org/10.1007/s10668-014-9604-z (cf. p. 33, 34, 37, 44)

Hatem, F. (2004). Modèles, prévision et prospective. *Les Docs d'ALEPH*, (18), 13 (cf. p. 48, 80).

Hatzfeld, H. (2006). *Les espaces libres, atouts des grands ensembles*. CERTU. (Cf. p. 310)
OCLC : 636151598.

Haughton, G. (1999). Environmental Justice and the Sustainable City. *Journal of Planning Education and Research*, *18*(3), 233-243. https://doi.org/10.1177/0739456X9901800305 (cf. p. 26, 32-37)

He, W., Chen, Y. & Yin, Z. (2016). Adaptive Neural Network Control of an Uncertain Robot With Full-State Constraints. *IEEE Transactions on Cybernetics*, *46*(3), 620-629. https://doi.org/10.1109/TCYB.2015.2411285 (cf. p. 90)

He, W. & Dong, Y. (2018). Adaptive Fuzzy Neural Network Control for a Constrained Robot Using Impedance Learning. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, *29*(4), 1174-1186. https://doi.org/10.1109/TNNLS.2017.2665581 (cf. p. 90)

Heathcote, E. & Vicario, L. (2017). Is the Bilbao Effect Over? *Apollo Magazine* (cf. p. 369).

Heinonen, J., Jalas, M., Juntunen, J. K., Ala-Mantila, S. & Junnila, S. (2013). Situated lifestyles : I. How lifestyles change along with the level of urbanization and what the greenhouse gas implications are—a study of Finland. *Environmental Research Letters*, *8*(2), 025003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/025003 (cf. p. 69)

Heiple, S. & Sailor, D. J. (2008). Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles. *Energy and Buildings*, *40*(8), 1426-1436. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.01.005 (cf. p. 100)

Henriot, C. (2015). Les politiques chinoises de villes nouvelles : trajectoire et ajustements de l'action publique urbaine à Shanghai. *Géocarrefour*, *90*(90/1), 27-38. https://doi.org/10.4000/geocarrefour.9659 (cf. p. 92)

Héran, F. (2015). La ville durable, nouveau modèle urbain ou changement de paradigme ? *Métropolitiques*. Récupérée 5 octobre 2020, à partir de https://metropolitiques.eu/La-ville-durable-nouveau-modele.html (cf. p. 74, 75)

Hernandez, W. & Mendez, A. (2018). Application of Principal Component Analysis to Image Compression. *Statistics - Growing Data Sets and Growing Demand for Statistics*. https://doi.org/10.5772/intechopen.75007 (cf. p. 90)

Hernández U., O., Guinea, D. & Santos, M. (2014). Semantic Sensors : A Proposal From Smart Building to Smart City Model. *Memoria Del Encuentro Nacional de Ciencias de La Computación* (cf. p. 38).

Hidalgo, A. & Lee, E. M. (2017). Tackling climate change : A job for cities. *Green European Journal*. Récupérée 19 avril 2018, à partir de https://www.greeneuropeanjournal.eu/tackling-climate-change-a-job-for-cities/ (cf. p. 29)

Hinds, J., Williams, E. J. & Joinson, A. N. (2020). "It Wouldn't Happen to Me" : Privacy Concerns and Perspectives Following the Cambridge Analy-

tica Scandal. *International Journal of Human-Computer Studies*, *143*, 102498. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2020.102498 (cf. p. 40)

Hiremath, R. B., Balachandra, P., Kumar, B., Bansode, S. S. & Murali, J. (2013). Indicator-Based Urban Sustainability—A Review. *Energy for Sustainable Development*, *17*(6), 555-563. https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.08.004 (cf. p. 36)

Hirschberger, S., Pinson, G. & Reiffers, É. (2018). L'appel à projets urbains « 50 000 logements » à Bordeaux : la mise en échec de la métropole stratège - Métropolitiques. *metropolitiques.eu* (cf. p. 12, 14, 54, 55).

Hiscock, S. (2017). Arrivée de la LGV Bordeaux-Paris : la population de Bruges va augmenter de plusieurs milliers d'habitants. *France Bleu* (cf. p. 12).

Hoang, M. (2019). Bercy libère 15 millions de transactions immobilières en ouvrant la base des demandes de valeurs foncières. https://www.etalab.gouv.fr/bercy-libere-15-millions-de-transactions-immobilieres-en-ouvrant-la-base-des-demandes-de-valeurs-foncieres. (Cf. p. 199)

Hochscheid, E. & Halin, G. (2018). L'adoption Du BIM Dans Les Agences d'architecture En France. *SCAN'18 : Séminaire de Conception Architecturale Numérique*, *47*, 01009. https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701009 (cf. p. 98)

Höjer, M. & Wangel, J. (2015). Smart Sustainable Cities : Definition and Challenges. In L. M. Hilty & B. Aebischer (Éd.), *ICT Innovations for Sustainability* (p. 333-349). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_20. (Cf. p. 34, 37, 38, 41, 60)

Holman, I. P., Rounsevell, M. D. A., Shackley, S., Harrison, P. A., Nicholls, R. J., Berry, P. M. & Audsley, E. (2005). A Regional, Multi-Sectoral And Integrated Assessment Of The Impacts Of Climate And Socio-Economic Change In The Uk. *Climatic Change*, *71*(1), 9-41. https://doi.org/10.1007/s10584-005-5927-y (cf. p. 77, 101)

Hoornweg, D., Sugar, L. & Trejos Gómez, C. L. (2011). Cities and Greenhouse Gas Emissions : Moving Forward. *Environment and Urbanization*, *23*(1), 207-227. https://doi.org/10.1177/0956247810392270 (cf. p. 17, 18)

Houet, T., Marchadier, C., Bretagne, G., Moine, M. P., Aguejdad, R., Viguié, V., Bonhomme, M., Lemonsu, A., Avner, P., Hidalgo, J. & Masson, V. (2016). Combining Narratives and Modelling Approaches to Simulate Fine Scale and Long-Term Urban Growth Scenarios for Climate Adaptation. *Environmental Modelling & Software*, *86*(Supplement C), 1-13. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.010 (cf. p. 2, 188)

House, C. (2018a). Spatial Justice and the Right to the City. (Cf. p. 25).

House, C. (2018b). Urban Design & Social Justice : Jane Jacobs. (Cf. p. 25, 26).

House, C. (2019). Social Justice in the Street. (Cf. p. 26).

Houser, K. A. & Voss, W. G. (2018). GDPR : The End of Google and Facebook Or a New Paradigm in Data Privacy. *Richmond Journal of Law & Technology*, *25*, 1 (cf. p. 40).

Huang, J., Zhou, Q. & Wu, Z. (2016). Delineating Urban Fringe Area by Land Cover Information Entropy—An Empirical Study of Guangzhou-Foshan Metropolitan Area, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *5*(5), 59. https://doi.org/10.3390/ijgi5050059 (cf. p. 128, 131, 142)

IAU Île de France. (2010). Les îlots de chaleur urbains. Répertoire de fiches connaissance. *Répertoire de fiches connaissance*, 58 (cf. p. 20).

IFP Energies Nouvelles. (2019). Smart City : les enjeux énergétiques de la ville durable. (Cf. p. 43).

INRA & IFSTTAR. (2017a). *Rapport - Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : déterminants, impacts et leviers d'action* (Rapport de l'expertise scientifique collective). INRA et IFSTTAR. (Cf. p. 269).

INRA & IFSTTAR. (2017b). *Résumé - Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : déterminants, impacts et leviers d'action* (Résumé du Rapport de l'expertise scientifique collective). INRA et IFSTTAR. (Cf. p. 267, 268).

INSEE. (2016, octobre 13). *Définition - IRIS | Insee*. Récupérée 21 janvier 2019, à partir de https://www.insee.fr/en/metadonnees/definition/c1523. (Cf. p. 116)

IPCC & Stocker, T. (Éd.). (2014). *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis ; Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press. (Cf. p. 16) OCLC : 871571414.

Islam, H., Jollands, M. & Setunge, S. (2015). Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Implication of Residential Buildings—A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*, 129-140. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.006 (cf. p. 81)

Jacque, M. (2020). Municipales : Les Verts prennent les commandes de nombreuses grandes villes. *Les Echos* (cf. p. 11).

Jacquot, S. (2005). Aménagement urbain et tourisme. (Cf. p. 49, 50).

Jaitley, U. (2019). Why Data Normalization Is Necessary for Machine Learning Models. (Cf. p. 119).

Jeantet, D. (2016). Climat : des grandes villes américaines défient Donald Trump. *Le Figaro.fr* (cf. p. 29).

Jiang, H. & Nachum, O. (2020). Identifying and Correcting Label Bias in Machine Learning. *International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, 702-712 (cf. p. 91).

Jonathan, N., MacLean, H. L. & Kennedy, C. A. (2006). Comparing High and Low Residential Density : Life-Cycle Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Urban Planning and Development*, *132*(1), 10-21. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2006)132:1(10) (cf. p. 67, 69)

Julsrud, D. T. E. & Krogstad, D. J. R. (2020). Is there enough trust for the smart city? exploring acceptance for use of mobile phone data in oslo and tallinn. *Technological Forecasting and Social Change*, *161*, 120314. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120314 (cf. p. 40)

Kalma, J. D., McVicar, T. R. & McCabe, M. F. (2008). Estimating Land Surface Evaporation : A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data. *Surveys in Geophysics*, *29*(4), 421-469. https://doi.org/10.1007/s10712-008-9037-z (cf. p. 214)

Kauffmann, Sylvie. (2020). A Davos, Donald Trump s'est posé en climatosceptique assumé. *Le Monde.fr* (cf. p. 29).

Kaufmann, V. & Sager, F. (2009). Amarrer le développement urbain aux infrastructures de transport publics : examen comparatif des politiques locales de quatre agglomérations suisses. *Environnement Urbain / Urban Environment*, (Volume 3) (cf. p. 1, 16, 280).

Kearns, A., Whitley, E., Mason, P. & Bond, L. (2012). 'Living the High Life'? Residential, Social and Psychosocial Outcomes for High-Rise Occupants

in a Deprived Context. *Housing Studies*, *27*(1), 97-126. https://doi.org/10.1080/02673037.2012.632080 (cf. p. 201)
_eprint : https://doi.org/10.1080/02673037.2012.632080

Keirstead, J., Jennings, M. & Sivakumar, A. (2012). A Review of Urban Energy System Models : Approaches, Challenges and Opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(6), 3847-3866. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047 (cf. p. 76, 79, 81)

Kellett, R., Christen, A., Coops, N. C., van der Laan, M., Crawford, B., Tooke, T. R. & Olchovski, I. (2013). A systems approach to carbon cycling and emissions modeling at an urban neighborhood scale. *Landscape and Urban Planning*, *110*, 48-58. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.10.002 (cf. p. 101, 117, 135, 136)

Kellett, R. & Girling, C. (2018). *elements db*. Récupérée 14 mai 2018, à partir de https://elementsdb.sala.ubc.ca/. (Cf. p. 106)

Kennedy, C., Pincetl, S. & Bunje, P. (2011). The Study of Urban Metabolism and Its Applications to Urban Planning and Design. *Environmental Pollution*, *159*(8), 1965-1973. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.022 (cf. p. 72, 101, 113, 117)

Khosravaninezhad, S. & Akbari, R. (2014). Application of Environmental Justice Concept in Urban Planning, the Peri-Urban Environment of Tehran as the Case Study. *Urban Planning*, *24*(1), 9 (cf. p. 23, 26).

Kilias, V., Rigopoulos, A. & Giannakidis, G. (2015). *Geographical Information Systems Energy Database Report* (Deliverable N° D1.9). (Cf. p. 102, 103).

Kim, S.-J., Koh, K., Lustig, M., Boyd, S. & Gorinevsky, D. (2007). An Interior-Point Method for Large-Scale L1-Regularized Least Squares. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, *1*(4), 606-617. https://doi.org/10.1109/JSTSP.2007.910971 (cf. p. 129)

Kim, T.-h., Ramos, C. & Mohammed, S. (2017). Smart City and IoT. *Future Generation Computer Systems*, *76*, 159-162. https://doi.org/10.1016/j.future.2017.03.034 (cf. p. 38, 39)

Kolokotroni, M. & Giridharan, R. (2008). Urban Heat Island Intensity in London : An Investigation of the Impact of Physical Characteristics on Changes in Outdoor Air Temperature during Summer. *Solar Energy*, *82*(11), 986-998. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.004 (cf. p. 21, 215)

Kourtit, K., Nijkamp, P. & Wahlström, M. H. (2020). How to Make Cities the Home of People – a 'Soul and Body' Analysis of Urban Attractiveness. *Land Use Policy*, 104734. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104734 (cf. p. 368, 369, 371)

Kozlowska, I. (2018). Facebook and Data Privacy in the Age of Cambridge Analytica. (Cf. p. 40, 91).

Krieger, J. & Higgins, D. L. (2002). Housing and Health : Time Again for Public Health Action. *American Journal of Public Health*, *92*(5), 758-768. https://doi.org/10.2105/AJPH.92.5.758 (cf. p. 14)

Krier, L. (1996). *Architecture, Choice or Fate*. (Cf. p. 65, 66).

Kumar, H., Singh, M. K., Gupta, M. P. & Madaan, J. (2020). Moving towards smart cities : Solutions that lead to the Smart City Transformation Framework. *Technological Forecasting and Social Change*, *153*, 119281. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.04.024 (cf. p. 38, 39)

Kumar, P., Druckman, A., Gallagher, J., Gatersleben, B., Allison, S., Eisenman, T. S., Hoang, U., Hama, S., Tiwari, A., Sharma, A., Abhijith, K. V.,

Adlakha, D., McNabola, A., Astell-Burt, T., Feng, X., Skeldon, A. C., de Lusignan, S. & Morawska, L. (2019). The Nexus between Air Pollution, Green Infrastructure and Human Health. *Environment International*, *133*, 105181. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105181 (cf. p. 60, 311)

Kypreos, S., Blesl, M., Cosmi, C., Kanudia, A., Loulou, R., Smekens, K., Salvia, M., Van Regemorter, D. & Cuomo, V. (2008a). TIMES-EU : A Pan-European Model Integrating LCA and External Costs. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, *3*(2), 180-194. https://doi.org/10.2495/SDP-V3-N2-180-194 (cf. p. 82)

Kypreos, S., Blesl, M., Cosmi, C., Kanudia, A., Loulou, R., Smekens, K., Salvia, M., Van Regemorter, D. & Cuomo, V. (2008b). TIMES-EU : A Pan-European Model Integrating LCA and External Costs. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, *3*(2), 180-194. https://doi.org/10.2495/SDP-V3-N2-180-194 (cf. p. 194)

La Tronche en biais. (2019). La Prospective : Boule de Cristal Ou Méthode Scientifique ? (Cf. p. 80).

Laaidi Karine, Zeghnoun Abdelkrim, Dousset Bénédicte, Bretin Philippe, Vandentorren Stéphanie, Giraudet Emmanuel & Beaudeau Pascal. (2012). The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave. *Environmental Health Perspectives*, *120*(2), 254-259. https://doi.org/10.1289/ehp.1103532 (cf. p. 22)

Laconte, P. (2018). Smart and Sustainable Cities : What Is Smart ?—What Is Sustainable ? In A. Bisello, D. Vettorato, P. Laconte & S. Costa (Éd.), *Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions* (p. 3-19). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75774-2_1. (Cf. p. 33, 39, 41)

Laffitte, P. (2020). ZAC à maîtrise foncière partielle : quel contrôle sur les constructeurs autonomes ? *Le Moniteur* (cf. p. 52, 55).

Laison, F., Faure, P. & Bosdecher, L. (2019). Métropole de Bordeaux : six villes à l'heure de l'open data. *SudOuest.fr* (cf. p. 99).

Lamblin, V. (2010). *Rapport d'étude prospective : construction de scénarios contrastés de transition vers la ville post-carbone* (rapp. tech. DRAST08339VL). Futuribles. (Cf. p. 80).

Lardon, S., Marraccini, E., Filippini, R., Gennai-Schott, S., Johany, F. & Rizzo, D. (2016). Prospective participative pour la zone urbaine de Pise (Italie) : l'eau et l'alimentation comme enjeux de développement territorial. *Cahiers de géographie du Québec*, *60*(170), 265-286. https://doi.org/10.7202/1040535ar (cf. p. 80)

Larivière, I. & Lafrance, G. (1999). Modelling the Electricity Consumption of Cities : Effect of Urban Density. *Energy Economics*, *21*(1), 53-66. https://doi.org/10.1016/S0140-9883(98)00007-3 (cf. p. 66)

Latune, J., Levrel, H. & Frascaria-Lacoste, N. (2019). Où en est la France en matière de compensation écologique ? . Eléments de réponses à partir de l'analyse des mesures compensatoires mises en place dans le cadre de la Ligne à Grande Vitesse Sud Europe Atlantique et mises en perspective avec les Sites Naturels de Compensation et des initiatives territoriales. *Cybergeo : European Journal of Geography*. https://doi.org/10.4000/cybergeo.33228 (cf. p. 187)

Lausson, J. (2016). Open Data : l'État assistera les collectivités dans l'ouverture de leurs données. *Numerama* (cf. p. 98).

Lavigne, C. (2011). *Archéogéographie de Bordeaux Nord* (rapp. tech.). (Cf. p. 46).

Law, C. M. (1992). Urban Tourism and Its Contribution to Economic Regeneration : *Urban Studies*, *29*(3/4), 599-618. https : / / doi . org / 10 . 1080 / 00420989220080581 (cf. p. 367)

Le Bras, J. & Masson, V. (2015). A Fast and Spatialized Urban Weather Generator for Long-Term Urban Studies at the City-Scale. *Frontiers in Earth Science*, *3*. https://doi.org/10.3389/feart.2015.00027 (cf. p. 20, 22)

Le Fur, M. & Cougny, C. (2019). *Présentation - Objectif "zéro artificialisation nette" : quels leviers pour protéger les sols ?* (Dossier de présentation). France Stratégie. (Cf. p. 267, 268).

Le Gallic, T. (2017a). *Penser nos futurs modes de vie dans les démarches de prospective énergétique : proposition d'une approche par la modélisation* (Thèse de doctorat). PSL Research university. MINES ParisTech. (Cf. p. 82).

Le Gallic, T. (2017b, décembre 21). *Penser nos futurs modes de vie dans les démarches de prospective énergétique : proposition d'une approche par la modélisation* (Thèse de doctorat). PSL Research university. MINES ParisTech. (Cf. p. 181, 252).

Le Gallic, T., Assoumou, E. & Maïzi, N. (2017). Future Demand for Energy Services through a Quantitative Approach of Lifestyles. *Energy*, *141*, 2613-2627. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.065 (cf. p. 79)

Le Monde. (2016). Jeu de go : victoire finale de l'intelligence artificielle sur le score de 4 à 1. *Le Monde.fr* (cf. p. 91).

Le Monde. (2017). L'intelligence artificielle AlphaGo bat une nouvelle fois le champion du monde de go. *Le Monde.fr* (cf. p. 91).

Le Néchet, F. (2015). De la forme urbaine à la structure métropolitaine : une typologie de la configuration interne des densités pour les principales métropoles européennes de l'Audit Urbain. *Cybergeo : European Journal of Geography*. https://doi.org/10.4000/cybergeo.26753 (cf. p. 308)

Le Renard, S. (2018). Réinventer Paris : les projets à l'épreuve du concret. *La Gazette des Communes* (cf. p. 60-62).

Le Treut, H. (2013). *Les impacts du changement climatique en Aquitaine un état des lieux scientifique* (Région Nouvelle-Aquitaine). Presses universitaires de Bordeaux : LGPA-Editions. (Cf. p. 94).

Leahy, S. (2018). Cities emit 60% more carbon than thought. *National Geographic News*. Récupérée 19 avril 2018, à partir de https://news.nationalgeographic.com/2018/03/city-consumption-greenhouse-gases-carbon-c40-spd/ (cf. p. 29)

Lecomte, E. (2015). In Sun We Trust, la start-up qui veut vous inciter à passer au photovoltaïque. *Sciences et Avenir* (cf. p. 90).

Lecun, Y., Bottou, L., Bengio, Y. & Haffner, P. (1998). Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition. *Proceedings of the IEEE*, *86*(11), 2278-2324. https://doi.org/10.1109/5.726791 (cf. p. 219)

Legoux, L. (2010). Les migrants climatiques et l'accueil des réfugiés en France et en Europe. *Revue Tiers Monde*, *n°204*(4), 55-67 (cf. p. 252).

Lemonsu, A., Viguié, V., Daniel, M. & Masson, V. (2015). Vulnerability to Heat Waves : Impact of Urban Expansion Scenarios on Urban Heat Island and Heat Stress in Paris (France). *Urban Climate*, *14*, 586-605. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.007 (cf. p. 180)

Leo Kumar, S. P. (2017). State of The Art-Intense Review on Artificial Intelligence Systems Application in Process Planning and Manufacturing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *65*, 294-329. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.08.005 (cf. p. 90)

Lequen, C. (2018). L'expérience ressentie au quotidien dans l'espace public selon le genre. (Cf. p. 24).

L'Express & AFP. (2016). COP21 : "Un jour historique", l'accord de Paris sur le climat entre en vigueur. *LExpress.fr* (cf. p. 19).

Lhotellier, J., Less, E., Bossanne, E. & Pesnel, S. (2018). *Modélisation et évaluation des impacts environnementauxde produits de consommation et biens d'équipements* (rapp. tech.). ADEME. Angers. (Cf. p. 17).

Li, X., Zhou, Y., Yu, S., Jia, G., Li, H. & Li, W. (2019). Urban Heat Island Impacts on Building Energy Consumption : A Review of Approaches and Findings. *Energy*, *174*, 407-419. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.183 (cf. p. 20)

Li, X., Yao, R., Liu, M., Costanzo, V., Yu, W., Wang, W., Short, A. & Li, B. (2018). Developing Urban Residential Reference Buildings Using Clustering Analysis of Satellite Images. *Energy and Buildings*, *169*, 417-429. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.064 (cf. p. 106)

Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I. F. & Sobrino, J. A. (2013). Satellite-Derived Land Surface Temperature : Current Status and Perspectives. *Remote Sensing of Environment*, *131*, 14-37. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008 (cf. p. 214)

Li, Z., Quan, S. J. & Yang, P. P.-J. (2016). Energy performance simulation for planning a low carbon neighborhood urban district : A case study in the city of Macau. *Habitat International*, *53*, 206-214. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.11.010 (cf. p. 131, 132)

Liao, Y. (2018). From Individual to Collective Behaviours : Exploring Variations of Human Mobility in Space and Time Based onSocial Media Data. (Cf. p. 90, 121).

Lictevout, L. (2019). Climat : 4 ans après l'accord de Paris, quel bilan pour l'Union européenne ? (Cf. p. 19).

Liénard, S. & Clergeau, P. (2011). Trame Verte et Bleue : Utilisation des cartes d'occupation du sol pour une première approche qualitative de la biodiversité. *Cybergeo : European Journal of Geography*. https://doi.org/10.4000/cybergeo.23494 (cf. p. 268)

Ligmann-Zielinska, A., Church, R. L. & Jankowski, P. (2008). Spatial Optimization as a Generative Technique for Sustainable Multiobjective Land-use Allocation. *International Journal of Geographical Information Science*, *22*(6), 601-622. https://doi.org/10.1080/13658810701587495 (cf. p. 100, 209)

Lin, T.-P., Chen, Y.-C. & Matzarakis, A. (2017). Urban Thermal Stress Climatic Mapping : Combination of Long-Term Climate Data and Thermal Stress Risk Evaluation. *Sustainable Cities and Society*, *34*(Supplement C), 12-21. https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.022 (cf. p. 22)

Lisetti, C. L. & Schiano, D. J. (2000). Automatic facial expression interpretation : Where human-computer interaction, artificial intelligence and cognitive science intersect. *Pragmatics & Cognition*, *8*(1), 185-235. https://doi.org/10.1075/pc.8.1.09lis (cf. p. 90)

Liu, W. & Song, Z. (2020). Review of Studies on the Resilience of Urban Critical Infrastructure Networks. *Reliability Engineering & System Safety*, *193*, 106617. https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106617 (cf. p. 43)

LOI N° 2016-1321 Du 7 Octobre 2016 Pour Une République Numérique (1). (2016). (Cf. p. 98).

Loisier, A.-C. & Petel, A.-L. (2019). *Les enjeux de l'artificialisation des sols : diagnostic* (Rapport du Comité pour l'économie verte). Comité pour l'Économie Verte. (Cf. p. 267, 269).

Long, N. & Kergomard, C. (2005). Classification Morphologique Du Tissu Urbain Pour Des Applications Climatologiques. Cas de Marseille. *Revue internationale de géomatique*, *15*, 487-512 (cf. p. 106, 107, 117).

Longeot, J.-F. & Dantec, R. (2017). *Rapport fait au nom de la commission d'enquête sur la réalité des mesures de compensation des atteintes à la biodiversité engagées sur des grands projets d'infrastructures, intégrant les mesures d'anticipation, les études préalables, les conditions de réalisation et leur suivi* (Rapport du Sénat N° 517). Sénat. Paris. (Cf. p. 187).

Losonczy, A. K. (2020). Socio-Spatial Understanding of the Network of Budapest Local Centers | 26th International Sustainable Development Research Society Conference | Ex Ordo. (Cf. p. 280).

Loulou, R., Remne, U., Kanudia, A., Lehtila, A. & Goldstein, G. (2005). Documentation for the TIMES Model. Récupérée 4 octobre 2018, à partir de https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times. (Cf. p. 176, 450)

Löw, M. (2015). *Sociologie de l'espace*. Éd. de la Maison des Sciences de l'Homme. (Cf. p. 95).

Lozano, M. (2017). Bordeaux-Paris : ce que la LGV va changer. *La Tribune* (cf. p. 12).

LPO PACA. (2016). *Contribution de jardins privés à la Trame Verte et Bleue urbaine : exemple de Vence* (Rapport ville de Vence). Ligue de Protection des Oiseaux. (Cf. p. 268).

LRA. (2018). MUSCADE — Laboratoire de Recherche En Architecture. (Cf. p. 22).

Lucas, K. (2012). Transport and Social Exclusion : Where Are We Now ? *Transport Policy*, *20*, 105-113. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.01.013 (cf. p. 279, 280)

Lucchini, F., Élissalde, B. & Freiré-Diaz, S. (2013). Caractériser l'attractivité des quartiers urbains par les données de la téléphonie mobile, Characterize the attractiveness of urban areas using mobile phone data. *L'Information géographique*, *77*(1), 44-62. https://doi.org/10.3917/lig.771.0044 (cf. p. 90)

Mac Namee, B., Cunningham, P., Byrne, S. & Corrigan, O. I. (2002). The Problem of Bias in Training Data in Regression Problems in Medical Decision Support. *Artificial Intelligence in Medicine*, *24*(1), 51-70. https://doi.org/10.1016/S0933-3657(01)00092-6 (cf. p. 91)

Madlener, R. & Sunak, Y. (2011). Impacts of Urbanization on Urban Structures and Energy Demand : What Can We Learn for Urban Energy Planning and Urbanization Management ? *Sustainable Cities and Society*, *1*(1), 45-53. https://doi.org/10.1016/j.scs.2010.08.006 (cf. p. 70)

Magail, J. (2019). L'origine des villes, à l'heure de la Smart City. *Smart City. Une autre lecture dans la ville* (Editions Ovadia, p. 85-105). (Cf. p. 94, 114).

Maillard, M. (2015). *Les grands pôles urbains et les zones rurales plus exposés au risque de pauvreté - Insee Flash Picardie - 4* (INSEE-Flash N° 4). INSEE. Picardie. (Cf. p. 27).

Mairie de Paris. (2018). Guide environnemental du Plan local d'urbanisme. (Cf. p. 52).

Maïzi, N. (2016). Dedicating multiscale approaches to low carbon prospective studies. Récupérée 2 octobre 2017, à partir de https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01320946 (cf. p. 176)

Mancebo, F. (2014). Périurbanisation et durabilité : inverser la perspective. *Cybergeo : European Journal of Geography*. https://doi.org/10.4000/cybergeo.26427 (cf. p. 67)

Mandard, S. (2019). Pollution de l'air : la France condamnée par la justice européenne pour ne pas avoir protégé ses citoyens. *Le Monde.fr* (cf. p. 11).

Manier, B. (2016). *Un milion de révolutions tranquilles : comment les citoyens changent le monde*. (Cf. p. 30)
OCLC : 1018449324.

Mao, B. (2019). « En cas d'effondrement, il n'y a pas d'avenir dans les grandes villes ». (Cf. p. 15).

Marchal, J. (2008, janvier). *Modélisation des performances énergétiques du parc de logements - État énergétique du parc en 2008*. Agence nationale de l'habitat. Récupérée 13 mars 2018, à partir de http://www.anah.fr/fileadmin/anah/Mediatheque/Publications/Les_etudes/rapport_performances_energetiques.pdf. (Cf. p. 106, 135, 136)

Marchand, B. (2001). La haine de la ville "Paris et le Désert français" de Jean-François Gravier. *L'Information géographique*, *65*, 234-253 (cf. p. 63).

Martin, M. (2017, juin). *Réflexion préalable à l'implémentation du BIM en agence d'urbanisme* (Professionnelle). École des Ponts. ANMA. (Cf. p. 71).

Martínez, C. F., Hodgson, F., Mullen, C. & Timms, P. (2018). Creating Inequality in Accessibility : The Relationships between Public Transport and Social Housing Policy in Deprived Areas of Santiago de Chile. *Journal of Transport Geography*, *67*, 102-109. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.09.006 (cf. p. 279)

Maruéjouls, É. (2011). La mixité à l'épreuve des loisirs des jeunes dans trois communes de Gironde. *Agora debats/jeunesses*, *N° 59*(3), 79-91 (cf. p. 24).

Massiot, A. (2019). Climat : 94 villes s'engagent pour un Green New Deal mondial. *Libération.fr* (cf. p. 29).

Masson, V., Marchadier, C., Adolphe, L., Aguejdad, R., Avner, P., Bonhomme, M., Bretagne, G., Briottet, X., Bueno, B., de Munck, C., Doukari, O., Hallegatte, S., Hidalgo, J., Houet, T., Le Bras, J., Lemonsu, A., Long, N., Moine, M. .-., Morel, T., … Zibouche, K. (2014). Adapting Cities to Climate Change : A Systemic Modelling Approach. *Urban Climate*, *10*, 407-429. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.004 (cf. p. 77, 188, 214)

Masson, V. (2009). Simulation intégrée de la ville : Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Energétique (MUSCADE). Récupérée 11 octobre 2017, à partir de https://www.umr-cnrm.fr/ville.climat/IMG/pdf/article_muscade_v4-2.pdf (cf. p. 20, 22)

Masson, V., GAME, AUAT, CERFACS, ENM-CIRED, GEODE, LRA, IMT & ONERA. (2013). *Adaptation Au Changement Climatique de l'agglomération*

Toulousaine (Rapport final). Récupérée 10 octobre 2017, à partir de http://lra.toulouse.archi.fr/lra/presentation/activites/projets/acclimat. (Cf. p. 2, 22)

Mastrucci, A., Baume, O., Stazi, F. & Leopold, U. (2014). Estimating energy savings for the residential building stock of an entire city : A GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam. *Energy and Buildings*, *75*, 358-367. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.032 (cf. p. 135, 138)

Mata, É., Sasic Kalagasidis, A. & Johnsson, F. (2014). Building-stock aggregation through archetype buildings : France, Germany, Spain and the UK. *Building and Environment*, *81*, 270-282. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.013 (cf. p. 106, 107, 135, 136, 143)

Mathieu, N. & Guermond, Y. (2011). Introduction - La ville durable : un enjeu scientifique. *La ville durable, du politique au scientifique* (p. 11). Editions Quæ. https://doi.org/10.3917/quae.guerm.2011.01.0011. (Cf. p. 33-35, 37, 84)

Maubant, A. P. (2020, février 27). *Pour y Voir plus Clair Sur Les Notions de Transparence et d'explicabilité En IA*. Récupérée 2 octobre 2020, à partir de https://medium.com/@AymericPM/pour-y-voir-plus-clair-sur-les-notions-de-transparence-et-dexplicabilit%C3%A9-en-ia-c0db2e96ae62. (Cf. p. 91)

Maurer, J., Twiss, J., Weiner, J., Oliver, J., Kaye, D., Aduba, U. & Brooks, D. (2017). Economic Development Incentives. (Cf. p. 368)
Translated title : Economic Development Incentiv IMDb ID : tt7543654 event-location : null.

Mavrogianni, A., Davies, M., Chalabi, Z., Wilkinson, P., Kolokotroni, M. & Milner, J. (2009). Space Heating Demand and Heatwave Vulnerability : London Domestic Stock. *Building Research & Information*, *37*(5-6), 583-597. https://doi.org/10.1080/09613210903162597 (cf. p. 21, 100, 101, 215)

Mayer, H. & Höppe, P. (1987). Thermal Comfort of Man in Different Urban Environments. *Theoretical and Applied Climatology*, *38*(1), 43-49. https://doi.org/10.1007/BF00866252 (cf. p. 21)

Mazon, R. (2018). Open data et collectivités : qui fait quoi, et comment ? *La Gazette des Communes* (cf. p. 98).

McCulloch, W. S. & Pitts, W. (1943). A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, *5*(4), 115-133. https://doi.org/10.1007/BF02478259 (cf. p. 217)

McDowell, L. (1983). Towards an Understanding of the Gender Division of Urban Space. *Environment and Planning D : Society and Space*, *1*(1), 59-72. https://doi.org/10.1068/d010059 (cf. p. 24)

Mellit, A. & Kalogirou, S. A. (2008). Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications : A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, *34*(5), 574-632. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.01.001 (cf. p. 90)

Menache, A. (2000). *Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games*. Morgan Kaufmann. (Cf. p. 90).

Mendes, G., Ioakimidis, C. & Ferrão, P. (2011). On the Planning and Analysis of Integrated Community Energy Systems : A Review and Survey of Available Tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(9), 4836-4854. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.067 (cf. p. 77, 79, 81)

Méo, G. D. (2012). Les femmes et la ville. Pour une géographie sociale du genre. *Annales de geographie*, *n° 684*(2), 107-127 (cf. p. 24).

Meunier, F., Redoutey, E. & Zetlaoui-Leger, J. (2018). Appels à projets innovants, concours de programmes ou de programmation ? *Urbanisme*, (410), 8-10 (cf. p. 59, 61, 62).

Meyer, N. M. (2015). Y a-t-il des élus préoccupés par l'intérêt général ? (Cf. p. 45).

Michaelson, C. (2014). The Competition for the Tallest Skyscraper : Implications for Global Ethics and Economics. *History, Theory & Criticism*, (4), 20-27 (cf. p. 369).

Miller, M. L. & Vaccari, C. (2020). Digital Threats to Democracy : Comparative Lessons and Possible Remedies. *The International Journal of Press/Politics*, *25*(3), 333-356. https://doi.org/10.1177/1940161220922323 (cf. p. 42)

Millot, A. (2019). *Faire la transition énergétique bas-carbone ou comment réaliser l'avènement d'un mythe ?* (Thèse de doct.). PSL Research University. (Cf. p. 181, 200, 318, 450).

Mineau, D. (2003). L'apport des SIG en urbanisme (The contribution of GIS to town planning). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, *80*(4), 443-453. https://doi.org/10.3406/bagf.2003.2356 (cf. p. 93, 95, 99, 103, 112)

Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales. (2020). Compétences des collectivités locales. (Cf. p. 10).

Ministère de la transition écologique et solidaire. (2018). *Présentation du plan Biodiversité* (Dossier de presse). Ministère de la transition écologique et solidaire. Paris. (Cf. p. 268).

Ministère de la transition écologique et solidaire. (2020). Diagnostic de performance énergétique - DPE. (Cf. p. 136).

Moghadam, S. T., Delmastro, C., Corgnati, S. P. & Lombardi, P. (2017). Urban Energy Planning Procedure for Sustainable Development in the Built Environment : A Review of Available Spatial Approaches. *Journal of Cleaner Production*, *165*, 811-827. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.142 (cf. p. 81)

Mokrech, M., Nicholls, R. J. & Dawson, R. J. (2012). Scenarios of Future Built Environment for Coastal Risk Assessment of Climate Change Using a GIS-Based Multicriteria Analysis. *Environment and Planning B : Planning and Design*, *39*(1), 120-136. https://doi.org/10.1068/b36077 (cf. p. 77)

Molina, G. (2014). Distinction et conformisme des architectes-urbanistes du « star system » - Métropolitiques. *metropolitiques.eu* (cf. p. 201).

Molinier, J. (1977). L'évolution de la population agricole du XVIIIe siècle à nos jours. *Economie et Statistique*, *91*(1), 79-84. https://doi.org/10.3406/estat.1977.3127 (cf. p. 1)

Monnot, N. & Berri, M. (2018). L'urbanisme alternatif. Des laboratoires d'expérimentation aux modèles standards. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, *113*(1), 208-219. https://doi.org/10.3406/aru.2018.3284 (cf. p. 58, 61, 62)

Monteiro, C. S., Costa, C., Pina, A., Santos, M. Y. & Ferrão, P. (2017). An Urban Building Database (UBD) supporting a Smart City Information System. *Energy and Buildings*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.009 (cf. p. 132, 133, 135, 136)

Monzon, A. (2015). Smart Cities Concept and Challenges : Bases for the Assessment of Smart City Projects. *2015 International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)*, 1-11 (cf. p. 33, 38, 39).

Moore, R. (2017). The Bilbao Effect : How Frank Gehry's Guggenheim Started a Global Craze. *The Observer* (cf. p. 369).

Moreau, J. (2017, avril 28). *Quelles stratégies mises en oeuvre par l'agence pour allier rentabilité économique et qualité architecturale dans le cadre de la commande privée ?* (Habilitation à la maîtrise d'oeuvre en son nom propre). ENSAPVS. ANMA. (Cf. p. 71).

Morel-Journel, C. & Pinson, G. (2013). Comment les villes ont appris la compétition, 3 (cf. p. 30, 367, 371).

Moselhi, O. & Shehab-Eldeen, T. (2000). Classification of Defects in Sewer Pipes Using Neural Networks. *Journal of Infrastructure Systems*, *6*(3), 97-104. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2000)6:3(97) (cf. p. 90)

Mousli, M. (2013). Prospective et action publique. *L'Economie politique*, *n° 60*(4), 91-105 (cf. p. 46).

Moussu, N. (2017). Le bâtiment intelligent consolide sa place dans la smart city. *Smart City Mag* (cf. p. 38).

Munier, J. (2018). La croissance des inégalités. (Cf. p. 24).

Murphy, T. (2017, mai 10). *Why data-driven science is more than just a buzzword*. Récupérée 3 mai 2018, à partir de http://theconversation.com/why-data-driven-science-is-more-than-just-a-buzzword-76949. (Cf. p. 79)

Mustafa, A., Bruwier, M., Archambeau, P., Erpicum, S., Pirotton, M., Dewals, B. & Teller, J. (2018). Effects of Spatial Planning on Future Flood Risks in Urban Environments. *Journal of Environmental Management*, *225*, 193-204. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.090 (cf. p. 2)

Mutani, G., Delmastro, C., Gargiulo, M. & Corgnati, S. P. (2016). Characterization of Building Thermal Energy Consumption at the Urban Scale. *Energy Procedia*, *101*, 384-391. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.049 (cf. p. 79, 106, 132, 133, 142, 143)

Mutani, G. & Todeschi, V. (2017). Space Heating Models at Urban Scale for Buildings in the City of Turin (Italy). *Energy Procedia*, *122*, 841-846. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.445 (cf. p. 79)

Nascimento, A. M., Vismari, L. F., Molina, C. B. S. T., Cugnasca, P. S., Camargo, J. B., de Almeida, J. R., Inam, R., Fersman, E., Marquezini, M. V. & Hata, A. Y. (2019). A Systematic Literature Review About the Impact of Artificial Intelligence on Autonomous Vehicle Safety. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1-19. https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2949915 (cf. p. 90)

Neha. (2020). Autonomous Parking Market with COVID-19 Impact Analysis | Likewise Industry Is Booming Globaly with Top Players. (Cf. p. 40).

Nemry, F. & Demirel, H. (2012, novembre 20). *Impacts of Climate Change on transport : A focus on road and rail transport infrastructures - EU Science Hub - European Commission*. Récupérée 18 septembre 2018, à partir de https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/impacts-climate-change-transport-focus-road-and-rail-transport-infrastructures. (Cf. p. 189, 200)

Neuer, L. (2018). « La ville intelligente est devenue une sorte de mythe salvateur ». (Cf. p. 37, 40, 42, 43).

New York Magazine. (2018). Good 'Smart Cities' Actually Need People to Live in Them. (Cf. p. 94).

Newling, B. E. (1969). The Spatial Variation of Urban Population Densities. *Geographical Review*, *59*(2), 242-252. https://doi.org/10.2307/213456 (cf. p. 66)

Newman, P. W. G. & Kenworthy, J. R. (1989). Gasoline Consumption and Cities. *Journal of the American Planning Association*, *55*(1), 24-37. https://doi.org/10.1080/01944368908975398 (cf. p. 67, 68)

Ng, E., Chen, L., Wang, Y. & Yuan, C. (2012). A Study on the Cooling Effects of Greening in a High-Density City : An Experience from Hong Kong. *Building and Environment*, *47*(Supplement C), 256-271. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.014 (cf. p. 215)

Nichol, J. E. & Wong, M. S. (2008). Spatial Variability of Air Temperature and Appropriate Resolution for Satellite-derived Air Temperature Estimation. *International Journal of Remote Sensing*, *29*(24), 7213-7223. https://doi.org/10.1080/01431160802192178 (cf. p. 214)

Noudelmann, F. (2009). "Je suis charrette", une expression disséquée. (Cf. p. 98).

Nourani, V., Hosseini Baghanam, A., Adamowski, J. & Kisi, O. (2014). Applications of hybrid wavelet–Artificial Intelligence models in hydrology : A review. *Journal of Hydrology*, *514*, 358-377. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.057 (cf. p. 90)

Nouvel, R., Mastrucci, A., Leopold, U., Baume, O., Coors, V. & Eicker, U. (2015). Combining GIS-based statistical and engineering urban heat consumption models : Towards a new framework for multi-scale policy support. *Energy and Buildings*, *107*, 204-212. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.021 (cf. p. 103, 107, 132, 133, 135, 143)

Nouvel, R., Zirak, M., Coors, V. & Eicker, U. (2017). The influence of data quality on urban heating demand modeling using 3D city models. *Computers, Environment and Urban Systems*, *64*, 68-80. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.12.005 (cf. p. 90)

Nussbaum, M. (2003). Capabilities as Fundemental Entitlements : Sen and Social Justice. *Feminist Economics*, *9*(2-3), 33-59. https://doi.org/10.1080/1354570022000077926 (cf. p. 23, 30)

Observatoire des inégalités. (2019). Grandes villes, le cœur des inégalités. (Cf. p. 1, 24).

OECD. (2010). *Cities and Climate Change*. Organisation for Economic Co-operation and Development. (Cf. p. 17).

Offner, J.-M. (1993). Les « effets structurants » du transport : mythe politique, mystification scientifique. *L'Espace géographique*, *22*(3), 233-242. https://doi.org/10.3406/spgeo.1993.3209 (cf. p. 280)

Offner, J.-M. (2014). Les effets structurants des infrastructures de transport. *L'Espace geographique, Tome 43*(1), 51-67 (cf. p. 280).

OGPP. (2016). *Rapport 2016 de l'Observatoire Girondin de la Précarité et de la Pauvreté* (rapp. tech.). Département de la Gironde. Bordeaux. (Cf. p. 24).

Oke, T. R. (1973). City Size and the Urban Heat Island. *Atmospheric Environment (1967)*, *7*(8), 769-779. https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6 (cf. p. 20)

O'Meara, M. (1999). Reinventing Cities for People and the Planet. *Worldwatch Paper*, (147), 4-94. https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0032870128&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Reinventing+Cities+for+People+and+the+Planet&st2=&sid=d48781ea40c04979c6330dce09e0a7fa&sot=b&sdt=b&sl=59&s=TITLE-ABS-KEY%28Reinventing+Cities+for+People+and+the+Planet%29&relpos=1&citeCnt=7&searchTerm= (cf. p. 15, 309, 311)

Orillard, C. (2018). Les appels à projets innovants : un renouveau de l'articulation public-privé dans l'aménagement urbain ? *Métropolitiques*, 6 (cf. p. 58, 60, 84).

Orsenna, É. & Gilsoul, N. (2018). *Désir de villes* [OCLC : 1031053462]. Robert Laffont. (Cf. p. 15, 59, 63, 92, 309).

Parakatil, S. (2019). Cities Are Engaged in a Global Competition. How Do the Best Keep Winning ? (Cf. p. 370).

Park, R. E. (1915). The City : Suggestions for the Investigation of Human Behavior in the City Environment. *American Journal of Sociology*, *20*(5), 577-612. https://doi.org/10.1086/212433 (cf. p. 2)

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M. & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn : Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, *12*, 2825-2830 (cf. p. 121).

Pellow, D. N. (2000). Environmental Inequality Formation : Toward a Theory of Environmental Injustice. *American Behavioral Scientist*, *43*(4), 581-601. https://doi.org/10.1177/0002764200043004004 (cf. p. 26)

Périnel, Q. (2015). Comment Les Chinois Construisent Des Villes-Champignons En Afrique. *Le Figaro* (cf. p. 92).

Petcou, C. & Petrescu, D. (2005). Au rez de chaussée de la ville. *Multitudes*, *no* 20(1), 75-87 (cf. p. 310).

Petraud, E. (2018). Smart City : Nouvel Eldorado Pour Les GAFAM ? (Cf. p. 41).

Peyrache-Gadeau, V. & Pecqueur, B. (2011). Villes durables et changement climatique : quelques enjeux sur le renouvellement des « ressources urbaines ». *Environnement Urbain / Urban Environment*, (Volume 5) (cf. p. 8, 16, 33, 35, 36).

Poirot, Jacques and Gérardin, Hubert. (2010). L'attractivité des territoires : un concept multidimensionnel. *Mondes en developpement*, *n° 149*(1), 27-41 (cf. p. 367-370).

Ponzini, D. (2010). Bilbao Effects and Narrative Defects., 17 (cf. p. 369).

Pope, A. (2008). Terminal Distribution. *Architectural Design*, *78*(1), 16-21. https://doi.org/10.1002/ad.603 (cf. p. 16)
_eprint : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ad.603

Portella, J. M. R. (2012). *Bottom-up description of the French building stock, including archetype buildings and energy demand* (Thèse de master). Récupérée 15 juin 2018, à partir de http://studentarbeten.chalmers.se. (Cf. p. 135, 136)

Poruschi, L. & Ambrey, C. L. (2016). On the Confluence of City Living, Energy Saving Behaviours and Direct Residential Energy Consumption. *Environmental Science & Policy*, *66*, 334-343. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.07.003 (cf. p. 1)

Pousin, F. (Éd.). (2014). *Figure de la ville et construction des savoirs : Architecture, urbanisme, géographie* (M. Vachaumard, Trad.). CNRS Éditions. (Cf. p. 2).

P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, ... J. Malley. (2019). *Climate Change and Land : An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems* (Special Report). IPCC. (Cf. p. 16).

Prudent, R. (2019). AVANT/APRES. Dans le Var, l'urbanisation galopante aggrave les dégâts causés par les inondations. *Franceinfo* (cf. p. 19).

Pumain, D. (1997). Pour Une Théorie Évolutive Des Villes. *Espace Geographique*, *26*(2), 119-134. https://doi.org/10.3406/spgeo.1997.1063 (cf. p. 2)

Pumain, D. (2010). Une théorie géographique des villes. *BSGLg* (cf. p. 2).

RAGE. (2012, juillet 1). *Programmepacte.fr - Analyse détaillée du parc résidentiel existant - Rapport*. RAGE. Récupérée 9 octobre 2017, à partir de http://www.programmepacte.fr/analyse-detaillee-du-parc-residentiel-existant-rapport. (Cf. p. 108, 143)

RAGE & Programme PACTE. (2017, juillet). *Analyse détaillée du parc résidentiel existant*. AQC. Récupérée 16 octobre 2018, à partir de https://www.programmepacte.fr/sites/default/files/pdf/ranalyseparcresidentielexistantneufrenojuil17073web.pdf. (Cf. p. 106)

Rajasekar, U. & Weng, Q. (2009). Application of Association Rule Mining for Exploring the Relationship between Urban Land Surface Temperature and Biophysical/Social Parameters. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *75*(4), 385-396. https://doi.org/10.14358/PERS.75.4.385 (cf. p. 214)

Randall-Texas A&M, K. (2017). Drop in Urban Density by 2050 Could Drive up Energy Use. (Cf. p. 66).

Ratti, C., Baker, N. & Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, *37*(7), 762-776. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010 (cf. p. 133, 135)

Raux, C., Traisnel, J.-P., Nicolas, J.-P., Maïzia, M. & Delvert, K. (2005). Bilans énergétiques Transport-Habitat et méthodologie BETEL. ETHEL. Rapport R2. Récupérée 10 octobre 2018, à partir de https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00101248/document (cf. p. 135, 136, 138)

Reclus, É. (.-1. (1881). *Nouvelle géographie universelle* (T. 2). Librairie Hachette et compagnie. (Cf. p. 12, 46).

Reinhart, C. F. & Cerezo Davila, C. (2016). Urban Building Energy Modeling – A Review of a Nascent Field. *Building and Environment*, *97*, 196-202. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001 (cf. p. 81, 105, 135)

Remme, U. & Blesl, M. (2008). A Global Perspective to Achieve a Low-Carbon Society (LCS) : Scenario Analysis with the ETSAP-TIAM Model. *Climate Policy*, *8*(sup1), S60-S75. https://doi.org/10.3763/cpol.2007.0493 (cf. p. 82) _eprint : https://doi.org/10.3763/cpol.2007.0493

REN21. (2019). *Renewables 2019 : Global Status Report*. REN21. (Cf. p. 16, 29).

Rey, O. (2014). *Une Question de Taille*. Stock. (Cf. p. 63, 73, 370).

Rey-Sahin, S. (2020). La rue Rivoli, à Paris, champ de batailles (LeMonde). *Le Monde.fr* (cf. p. 191).

Rivière, C. (2009). Didier Lapeyronnie, Ghetto urbain. Ségrégation, violence, pauvreté en France aujourd'hui. *Lectures* (cf. p. 1).

Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C. & Liu, C. (2008). A Review on the Generation, Determination and Mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, *20*(1), 120-128. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4 (cf. p. 20)

Robinson, D., Haldi, F., Kämpf, J., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A. & Wilke, U. (2009). Citysim : Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning. *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, 1083-1090 (cf. p. 188).

Rochard, U., Shanthirablan, S., Brejon, C., Chateau Le Bras, M., TABULA, Episcope & ADEME. (2015, mars). *Bâtiments résidentiels : typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France*. Union européenne. Paris. Récupérée 6 septembre 2018, à partir de http://episcope.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/FR_TABULA_TypologyBrochure_Pouget.pdf. (Cf. p. 106, 108, 136)

Rochon, F. (Éd.). (2014). *Habitat et transition énergétique* [OCLC : 885179672]. Harmattan. (Cf. p. 29).

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., … Foley, J. A. (2009). A Safe Operating Space for Humanity. *Nature*, *461*(7263), 472-475. https://doi.org/10.1038/461472a (cf. p. 16)

Rode, S. (2017). La conception de projets d'aménagement urbain comme processus collectif. *Espaces et societes*, *n° 171*(4), 145-161 (cf. p. 50, 55).

Rolland, S. (2016). Data City : voici les cinq startups qui vont (peut-être) changer Paris. *La Tribune* (cf. p. 90).

Ronneberger, O., Fischer, P. & Brox, T. (2015). U-Net : Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *arXiv:1505.04597 [cs]* (cf. p. 220).

Rosa, H. & Chaumont, T. (2015). *Aliénation et accélération : vers une théorie critique de la modernité tardive* [OCLC : 1041285340]. (Cf. p. 47).

Rosenblatt, F. (1958). The Perceptron : A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. *Psychological Review*, *65*(6), 386-408. https://doi.org/10.1037/h0042519 (cf. p. 217)

Ross, G. M. & Portugali, J. (2018). Urban Regulatory Focus : A New Concept Linking City Size to Human Behaviour. *Royal Society Open Science*, *5*(5). https://doi.org/10.1098/rsos.171478 (cf. p. 1)

Rousseau, D. & Vauzeilles, G. (1995). *L'aménagement Urbain (2e Éd. Corr.) / Denis Rousseau, Georges Vauzeilles*. (Cf. p. 50).

Rousseaux, F., Long, N. & Renouard, A. (2012). Vers une simulation de l'évolution des structures urbaines à partir d'une modélisation multi-agents. *[VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement*, *11*(3) (cf. p. 77, 81, 106, 107, 110, 121).

Roux, C., Schalbart, P., Assoumou, E. & Peuportier, B. (2016). Integrating Climate Change and Energy Mix Scenarios in LCA of Buildings and Districts. *Applied Energy*, *184*, 619-629. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.043 (cf. p. 194)

Royal Statistical Society. (2016, septembre). The Data Manifesto. Récupérée 3 mai 2018, à partir de http://www.rss.org.uk/RSS/Influencing_Change/Data_manifesto/RSS/Influencing_Change/Data_democracy_sub/Data_manifesto.aspx?hkey=5dd70207-82e7-4166-93fd-bcf9a2a1e496. (Cf. p. 79)

Ruiz, H. (2013). Chine : ces mégapoles qui sortent de nulle part. *Le Journal International - Archives* (cf. p. 92).

Sabbah, C. (2005). Le secteur privé se lance dans l'aménagement urbain. *Le Moniteur* (cf. p. 60).

Sachs, J., Moya, D., Giarola, S. & Hawkes, A. (2019). Clustered Spatially and Temporally Resolved Global Heat and Cooling Energy Demand in the

Residential Sector. *Applied Energy*, *250*, 48-62. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.011 (cf. p. 121)

Saga Cité. (2011). Au-delà des perceptions négatives, la densité : efficace et agréable. (Cf. p. 95).

Şahin, M. (2012). Modelling of Air Temperature Using Remote Sensing and Artificial Neural Network in Turkey. *Advances in Space Research*, *50*(7), 973-985. https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.021 (cf. p. 214)

Salvati, A., Coch, H. & Morganti, M. (2017). Effects of Urban Compactness on the Building Energy Performance in Mediterranean Climate. *Energy Procedia*, *122*(Supplement C), 499-504. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.303 (cf. p. 21, 69)

Salvucci, R., Tattini, J., Gargiulo, M., Lehtilä, A. & Karlsson, K. (2018). Modelling Transport Modal Shift in TIMES Models through Elasticities of Substitution. *Applied Energy*, *232*, 740-751. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.083 (cf. p. 194)

Samsatli, S. & Samsatli, N. J. (2018). A General Mixed Integer Linear Programming Model for the Design and Operation of Integrated Urban Energy Systems. *Journal of Cleaner Production*, *191*, 458-479. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.198 (cf. p. 100)

Sanchez, T. W. (2002). The Impact of Public Transport on US Metropolitan Wage Inequality. *Urban Studies*, *39*(3), 423-436. https://doi.org/10.1080/00420980220112766 (cf. p. 279)

Sanguansat, P. (2012). *Principal Component Analysis : Engineering Applications*. BoD – Books on Demand. (Cf. p. 90).

Saridis, G. (1983). Intelligent Robotic Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *28*(5), 547-557. https://doi.org/10.1109/TAC.1983.1103278 (cf. p. 90)

Sarralde, J. J., Quinn, D. & Wiesmann, D. (2011). Urban Modelling for Resource Performance Analysis : Estimating Cities' Renewable Energy Potential. *Proceedings of Building Simulation*, 1370-1377 (cf. p. 106).

Schelings, C. & Elsen, C. (2017). Smart City concepts : From perception to acceptabilit. *Proceedings of the 21thConference of the Environmental and Sustainability Management Accounting Network*. Récupérée 1 octobre 2020, à partir de https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/212435/1/Schelings%20%26%20Elsen%20-%20Smart%20City%20concepts-%20from%20perception%20to%20acceptability%20.pdf (cf. p. 40)

Schoenmakers, V., Gueguen, A. & Atelier de Production Graphique. (2007). *Mise en oeuvre et évaluation du SCoT de l'aire métropolitaine bordelaise : sensibilité des activités agricoles et sylvicoles au regard de la proximité urbaine* (J.-C. Chadanson, Éd. ; Rapport d'étude). A'urba / Sysdau / CUB. Bordeaux. (Cf. p. 45).

SciencesEtAvenir & AFP. (2015). "Ilots de chaleur urbains" : un fléau qui mobilise chercheurs et urbanistes. *Sciences et Avenir*, *1* (cf. p. 20).

Sen, A. (1999). *Commodities and Capabilities*. Oxford University Press. (Cf. p. 23).

Sepasgozar, S. M. E., Hawken, S., Sargolzaei, S. & Foroozanfa, M. (2019). Implementing citizen centric technology in developing smart cities : A model for predicting the acceptance of urban technologies. *Technological Forecasting and Social Change*, *142*, 105-116. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.09.012 (cf. p. 40, 41, 84)

Service SIG Territorial de la Collectivité de Corse. (2014). Qu'est Ce Que Le SIG ? (Cf. p. 97).

Seto, K. C., Dhakal, S., Bigio, A., Blanco, H., Delgado, G. C., Dewar, D., Huang, L., Inaba, A., Kansal, A., Lwasa, S., McMahon, J., Müller, D. B., Murakami, J., Nagendra, H. & Ramaswami, A. (2014). Chapter 12 - Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning. *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. IPCC Working Group III Contribution to AR5*. Cambridge University Press. (Cf. p. 17).

Seventh Framework Programme. (2014). Integrative Smart City Planning | INSMART Project | FP7 | CORDIS | European Commission. (Cf. p. 103).

Seventh Framework Programme. (2017). Design of a Decision Support Tool for Sustainable, Reliable and Cost-Effective Energy Strategies in Cities and Industrial Complexes | CitInES Project | FP7 | CORDIS | European Commission. (Cf. p. 103).

Shahin, M. A. (2016). State-of-the-art review of some artificial intelligence applications in pile foundations. *Geoscience Frontiers*, *7*(1), 33-44. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.10.002 (cf. p. 90)

Shammin, M. R., Herendeen, R. A., Hanson, M. J. & Wilson, E. J. H. (2010). A Multivariate Analysis of the Energy Intensity of Sprawl versus Compact Living in the U.S. for 2003. *Ecological Economics*, *69*(12), 2363-2373. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.07.003 (cf. p. 66)

Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, *27*, 379-423, 623-656 (cf. p. 131).

Shapin, S. (1989). The Invisible Technician. *American Scientist*, *77*(6), 554-563 (cf. p. 89).

Sharmin, T., Steemers, K. & Matzarakis, A. (2015). Analysis of Microclimatic Diversity and Outdoor Thermal Comfort Perceptions in the Tropical Megacity Dhaka, Bangladesh. *Building and Environment*, *94*, 734-750. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.10.007 (cf. p. 95)

Shi, Z. & He, L. (2010). Application of Neural Networks in Medical Image Processing. *Proceedings of the Second International Symposium on Networking and Network Security*, 4. Récupérée 28 septembre 2020, à partir de http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.403.4346&rep=rep1&type=pdf (cf. p. 90)

Shi, Z., Fonseca, J. A. & Schlueter, A. (2017). A Review of Simulation-Based Urban Form Generation and Optimization for Energy-Driven Urban Design. *Building and Environment*, *121*, 119-129. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.006 (cf. p. 75)

Sholla, S., Naaz, R. & Chishti, M. A. (2017). Ethics Aware Object Oriented Smart City Architecture. *China Communications*, *14*(5), 160-173. https://doi.org/10.1109/CC.2017.7942323 (cf. p. 41)

Shwartz-Ziv, R. & Tishby, N. (2017). Opening the Black Box of Deep Neural Networks via Information. Récupérée 28 septembre 2020, à partir de http://arxiv.org/abs/1703.00810 (cf. p. 90)

Siala, K. (2019). Flexible Spatial Distribution of Electricity Demand for Energy System Models. *International Energy Workshop* (cf. p. 117).

Simon, C., de Livonnière, S. & Alexandre, V. (2019). Inondations dans le sud de la France : la «soif de construire» mise en accusation (Le Parisien). *leparisien.fr* (cf. p. 19).

Simorre, É. (2015). *Le paysage des Grands ensembles : des théories urbaines aux pratiques habitantes. Cas de la Cité Modèle à Bruxelles, de 1958 à 2015* (other). Joining Nature et Cities (JNC International S.A.), chaussée d'Alsemberg 993, Boîte 4B, 1180 Bruxelles. (Cf. p. 310).

Snieska, V. & Zykiene, I. (2015). City Attractiveness for Investment : Characteristics and Underlying Factors. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *213*, 48-54. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.402 (cf. p. 367, 368, 370)

Snow, J. (1854). On the Mode of Communication of Cholera., 32 (cf. p. 96).

Soja, E. W. (2010a). Building a Spatial Theory of Justice. *Seeking Spatial Justice* (p. 67-110). University of Minnesota Press. (Cf. p. 25).

Soja, E. W. (2010b). *Seeking Spatial Justice : Prologue*. University of Minnesota Press. (Cf. p. 14, 26).

Soja, E. W. (2010c). Why Spatial? Why Justice? Why L.A. ? Why Now? *Seeking Spatial Justice* (p. 13-30). University of Minnesota Press. (Cf. p. 23, 25).

Solecki, W. D. & Oliveri, C. (2004). Downscaling Climate Change Scenarios in an Urban Land Use Change Model. *Journal of Environmental Management*, *72*(1), 105-115. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.03.014 (cf. p. 77, 101)

SOM. (2019). The Fight Against Climate Change Starts in Cities. (Cf. p. 14, 41).

Spatial Sciences Institute. (2020). Why GIS Is Important in Urban Planning. (Cf. p. 82).

Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I. & Salakhutdinov, R. (2014). Dropout : A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting. *The Journal of Machine Learning Research*, *15*(1), 1929-1958 (cf. p. 218).

Stambouli, J. (2012). L'évaluation des trames vertes urbaines : apports et limites de la socio-économie des transports. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, (Vol. 3, n° 3). https://doi.org/10.4000/developpementdurable.9417 (cf. p. 268)

Stébé, J.-M. & Marchal, H. (2010). Appréhender, penser et définir la ville. *Que sais-je ?*, *2e éd.*(3790), 3-16 (cf. p. 1, 10, 114).

Steele, W., Maccallum, D., Byrne, J. & Houston, D. (2012). Planning the Climate-Just City. *International Planning Studies*, *17*(1), 67-83. https://doi.org/10.1080/13563475.2011.638188 (cf. p. 24, 26)

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B. & Sörlin, S. (2015). Planetary Boundaries : Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science*, *347*(6223). https://doi.org/10.1126/science.1259855 (cf. p. 1)

Stein, L. (2015). Ten Years on, Hurricane Katrina's Scars Endure for Black New Orleans. *Reuters* (cf. p. 26).

Steinkraus, D., Buck, I. & Simard, P. (2005). Using GPUs for Machine Learning Algorithms. *Eighth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR'05)*, 1115-1120 Vol. 2. https://doi.org/10.1109/ICDAR.2005.251 (cf. p. 89)

Stewart, I. D. & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(12), 1879-1900. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1 (cf. p. 135)

Stiglitz, J. E. (2013). *The Price of Inequality* (1st ed). W.W. Norton & Company. (Cf. p. 1, 24, 25)
OCLC : 844041906.

Stjernborg, V. & Mattisson, O. (2016). The Role of Public Transport in Society—A Case Study of General Policy Documents in Sweden. *Sustainability*, *8*(11), 1120. https://doi.org/10.3390/su8111120 (cf. p. 279)

Sullivan, J., Sullivan, a. J. W., Tyler (editors, S. W., Luff, P., Xerox, R. & Europarc, C. (1994). *Intelligent User Interfaces*. (Cf. p. 90).

Swan, L. G. & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of End-Use Energy Consumption in the Residential Sector : A Review of Modeling Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(8), 1819-1835. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033 (cf. p. 76, 107)

Ta ninga, M. (2017). Immobilier : HabX veut développer le logement sur-mesure. *La Tribune (France)*, *6343*(6343), 61 (cf. p. 59, 60).

Talandier, M. (2019). Résilience des métropoles : le renouvellement des modèles. (Cf. p. 43).

Talandier, M., Jousseaume, V. & Nicot, B.-H. (2016). Two Centuries of Economic Territorial Dynamics : The Case of France. *Regional Studies, Regional Science*, *3*(1), 67-87. https://doi.org/10.1080/21681376.2015.1090887 (cf. p. 63, 66)

Tannier, C., Hirtzel, J., Stephenson, R., Couillet, A., Vuidel, G. & Youssoufi, S. (2016a). Conception and Use of an Individual-Based Model of Residential Choice in a Planning Decision Process. Feedback from an Experimental Trial in the City of Besançon, France. *Progress in Planning*, *108*, 1-38. https://doi.org/10.1016/j.progress.2015.04.001 (cf. p. 15)

Tannier, C., Hirtzel, J., Stephenson, R., Couillet, A., Vuidel, G. & Youssoufi, S. (2016b). Conception and Use of an Individual-Based Model of Residential Choice in a Planning Decision Process. Feedback from an Experimental Trial in the City of Besançon, France. *Progress in Planning*, *108*(Supplement C), 1-38. https://doi.org/10.1016/j.progress.2015.04.001 (cf. p. 78, 81, 188)

Tardioli, G., Kerrigan, R., Oates, M., O'Donnell, J. & Finn, D. P. (2018). Identification of Representative Buildings and Building Groups in Urban Datasets Using a Novel Pre-Processing, Classification, Clustering and Predictive Modelling Approach. *Building and Environment*, *140*, 90-106. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.035 (cf. p. 106)

Tate, L. (2018). Overview of GIS History. (Cf. p. 96, 97).

Tattini, J. (2018). *Improving the Representation of Consumers' Choice in Transport within Energy System Models* (Thèse de Doctorat). Technical University of Denmark. Lyngby. (Cf. p. 184, 188, 193).

Tattini, J., Gargiulo, M. & Karlsson, K. (2018). Reaching Carbon Neutral Transport Sector in Denmark – Evidence from the Incorporation of Modal Shift into the TIMES Energy System Modeling Framework. *Energy Policy*, *113*, 571-583. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.013 (cf. p. 188, 190, 191)

Taveau, K. (2017). Smart Cities : Comment Les GAFAM Vont s'en Emparer ? (Cf. p. 41, 94).

Tellier, D. (2011). *Apprendre à Philosopher Avec Bergson*. Ellipses. (Cf. p. 43, 45, 48).

Tenove, C., Buffie, J., McKay, S. & Moscrop, D. (2018). *Digital Threats to Democratic Elections : How Foreign Actors Use Digital Techniques to Undermine*

Democracy (SSRN Scholarly Paper N° ID 3235819). Social Science Research Network. Rochester, NY. https://doi.org/10.2139/ssrn.3235819. (Cf. p. 42)

Terrin, J.-J. (Éd.). (2015). *Villes et changement climatique : îlots de chaleur urbains = Cities and climate change : urban heat islands*. Parenthèses. (Cf. p. 214).

The Bloomsbury Geographer. (2014). Roger Tomlinson, 1933-2014. (Cf. p. 97).

The Economist. (2019). A Brief History of City Data. (Cf. p. 97).

Theurer, W. (1999). Typical Building Arrangements for Urban Air Pollution Modelling. *Atmospheric Environment*, *33*(24), 4057-4066. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00147-8 (cf. p. 107)

Thisse, J.-F. & Van Ypersele, T. (1999). Métropoles et concurrence territoriale. *Economie et Statistique*, *326*(1), 19-30. https://doi.org/10.3406/estat.1999.6223 (cf. p. 367, 368, 370)

Thomas, I., Jones, J., Caruso, G. & Gerber, P. (2018). City Delineation in European Applications of LUTI Models : Review and Tests. *Transport Reviews*, *38*(1), 6-32. https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1295112 (cf. p. 79, 112, 114)

Thyssenkrupp Elevatoro. (2016). Surmonter les défis de la densité urbaine. (Cf. p. 66).

Tobelem, J.-M. & Thuriot, F. (2019). Qu'est-ce qu'un équipement culturel structurant ? *http://publis-shs.univ-rouen.fr/rmt* (cf. p. 280).

Tomlinson, R. F. (1967). An introduction to the geographic information system of the Canada Land Inventory. *Department of Forestry and Rural Development, Ottawa, Canada* (cf. p. 97).

Tornay, N., Schoetter, R., Bonhomme, M., Faraut, S. & Masson, V. (2017a). GENIUS : A methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations. *Urban Climate*, *20*, 75-93. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.03.002 (cf. p. 106)

Tornay, N., Schoetter, R., Bonhomme, M., Faraut, S. & Masson, V. (2017b). GENIUS : A methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations. *Urban Climate*, *20*, 75-93. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.03.002 (cf. p. 131-133, 135, 136)

Torre, A., Melot, R., Magsi, H., Bossuet, L., Cadoret, A., Caron, A., Darly, S., Jeanneaux, P., Kirat, T., Pham, H. V. & Kolokouris, O. (2014). Identifying and Measuring Land-Use and Proximity Conflicts : Methods and Identification. *SpringerPlus*, *3*(1), 85. https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-85 (cf. p. 180)

Toubanos, T. (2019). La modularité et l'évolutivité : vecteurs d'intégration du développement durable | Espazium. (Cf. p. 310).

Toubin, M., Lhomme, S., Diab, Y., Serre, D. & Laganier, R. (2012). La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ? *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, (Vol. 3, n° 1). https://doi.org/10.4000/developpementdurable.9208 (cf. p. 43)

Tual, N. W. e. M. (2018). Linky : la CNIL met en demeure Direct Energie à propos des données personnelles [newspaper]. *Le Monde.fr : Pixels*. Récupérée 2 mai 2018, à partir de http://www.lemonde.fr/pixels/article/2018/03/27/linky-la-cnil-met-en-demeure-direct-energie-a-propos-des-donnees-personnelles_5276916_4408996.html (cf. p. 76)

UN. (2016, octobre 20). *The new urban agenda : Key commitments* [United nations sustainable development]. Récupérée 19 avril 2018, à partir de https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2016/10/newurbanagenda/. (Cf. p. 17)

UN. (2017a, novembre 6). *The new urban agenda* [Habitat III]. Récupérée 19 avril 2018, à partir de http://habitat3.org/the-new-urban-agenda/. (Cf. p. 17)

UN. (2017b). *Nouveau programme pour les villes* [Habitat III]. Récupérée 19 avril 2018, à partir de http://habitat3.org/the-new-urban-agenda/. (Cf. p. 17)

UN, Department of Economic and Social Affairs & Population Division. (2014). *World Urbanization Prospects : The 2014 Revision ; Highlights*. United Nations. (Cf. p. 18)
OCLC : 894726391.

Uri, C., Drouin, N., Manning, S. & Martineau, J. (2013). *50 000 logements autour du transport collectif* (rapp. tech.). A'urba. Bordeaux. (Cf. p. 12, 14, 81).

van der Wusten, H. (2016). La ville fonctionnelle et les modèles urbains qui lui ont succédé. Exemples d'une pratique politique en train de se globaliser. *EchoGéo*, (36). https://doi.org/10.4000/echogeo.14634 (cf. p. 73)

van Wee, B. (2015). Viewpoint : Toward a New Generation of Land Use Transport Interaction Models. *Journal of Transport and Land Use*, *8*(3), 1-10 (cf. p. 78, 79).

Vanin, L. (2019). Smart City : Une autre lecture de la ville. *Smart City. Une autre lecture dans la ville* (Editions Ovadia, p. 9-59). (Cf. p. 33, 37, 40, 43, 44, 181).

van Lent, M. & Laird, J. (1999). Developing an Artificial Intelligence Engine, 12 (cf. p. 90).

van Vliet, M., Kok, K. & Veldkamp, T. (2010). Linking Stakeholders and Modellers in Scenario Studies : The Use of Fuzzy Cognitive Maps as a Communication and Learning Tool. *Futures*, *42*(1), 1-14. https://doi.org/10.1016/j.futures.2009.08.005 (cf. p. 72)

Veres, S. M., Molnar, L., Lincoln, N. K. & Morice, C. P. (2011). Autonomous vehicle control systems — a review of decision making. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, *225*(2), 155-195. https://doi.org/10.1177/2041304110394727 (cf. p. 90)

Vermeylen, P. (2012). Métropolisation, compétition entre villes et positionnement stratégique : quelles leçons prospectives, notamment pour Liège et Charleroi ? *Les Cahiers nouveaux*, (82), 73-76 (cf. p. 369, 370).

Victoire, É. (2014). Classes et milieux sociaux. *Sociologie de Bordeaux* (La Découverte, p. 47-68). La Découverte. (Cf. p. 24).

Viguié, V. (2012a). *Modélisation Des Dynamiques Urbaines : Application à l'analyse Économique Du Changement Climatique* (These de Doctorat). Paris Est. (Cf. p. 117).

Viguié, V. (2012b). *Urban Dynamics Modelling : Application to Economics Assessment of Climate Change* (thèse de doct.). Université Paris-Est. (Cf. p. 2).

Viguié, V., Hallegatte, S. & Rozenberg, J. (2014a). Downscaling Long Term Socio-Economic Scenarios at City Scale : A Case Study on Paris. *Technological Forecasting and Social Change*, *87*(Supplement C), 305-324. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.12.028 (cf. p. 77, 101, 309)

Viguié, V., Hallegatte, S. & Rozenberg, J. (2014b). Downscaling Long Term Socio-Economic Scenarios at City Scale : A Case Study on Paris. *Technolo-*

gical Forecasting and Social Change, *87*, 305-324. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.12.028 (cf. p. 181)

Vilmin, T. (2015). *L'aménagement urbain : acteurs et système*. Éditions Parenthèses ; Cycle d' urbanisme de Sciences Po. (Cf. p. 49)
OCLC : 934918278.

VINCI Airports. (2020). Innovation : VINCI Airports et Stanley Robotics continuent l'aventure et étendent à 2 000 places le parking robotisé de l'aéroport Lyon-Saint Exupéry. (Cf. p. 40).

Voigt, S., Kemper, T., Riedlinger, T., Kiefl, R., Scholte, K. & Mehl, H. (2007). Satellite Image Analysis for Disaster and Crisis-Management Support. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *45*(6), 1520-1528. https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.895830 (cf. p. 90)

Vreenegoor, R., Hensen, J. & De Vries, B. (2008). Review of Existing Energy Performance Calculation Methods for District Use. *Transport*, *3*(1) (cf. p. 81).

Walsh, C. L., Dawson, R. J., Hall, J. W., Barr, S. L., Batty, M., Bristow, A. L., Carney, S., Dagoumas, A. S., Ford, A. C., Harpham, C., Tight, M. R., Watters, H. & Zanni, A. M. (2011). Assessment of Climate Change Mitigation and Adaptation in Cities. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Urban Design and Planning*, *164*(2), 75-84. https://doi.org/10.1680/udap.2011.164.2.75 (cf. p. 77)

Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, *58*(301), 236-244. https://doi.org/10.2307/2282967 (cf. p. 123)

Watson, V. (2009). 'The Planned City Sweeps the Poor Away...' : Urban Planning and 21st Century Urbanisation. *Progress in Planning*, *72*(3), 151-193. https://doi.org/10.1016/j.progress.2009.06.002 (cf. p. 3, 29, 30, 280)

WCED & Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future, From One Earth to One World* (rapp. tech.). World Commission on Environment and Development - UN. Oslo. (Cf. p. 34).

Wegener, M. & Fuerst, F. (2004). *Land-Use Transport Interaction : State of the Art* (rapp. tech. N° 0409005). University Library of Munich, Germany. (Cf. p. 77-79, 188).

White, R., Engelen, G. & Uljee, I. (1997). The Use of Constrained Cellular Automata for High-Resolution Modelling of Urban Land-Use Dynamics. *Environment and Planning B : Planning and Design*, *24*(3), 323-343. https://doi.org/10.1068/b240323 (cf. p. 180)

WHO Regional Office for Europe. (2016). *Urban Green Spaces and Health : A Review of Evidence* (rapp. tech.). WHO. Copenhagen. (Cf. p. 197).

Wiig, A. (2015). IBM's Smart City as Techno-Utopian Policy Mobility. *City*, *19*(2-3), 258-273. https://doi.org/10.1080/13604813.2015.1016275 (cf. p. 38)

Wikipédia. (2019). Diamètre hydraulique. *Wikipédia* (cf. p. 139).

Wikipédia. (2020a). Analyse en composantes principales. *Wikipédia* (cf. p. 119).

Wikipédia. (2020b). Bacalan. *Wikipédia* (cf. p. 54).

Wikipédia. (2020c). Bordeaux. *Wikipédia* (cf. p. 12)
Page Version ID : 174429534.

Wikipédia. (2020d). Bordeaux Métropole. *Wikipédia* (cf. p. 12)
Page Version ID : 174304867.

Wikipédia. (2020e). Building information modeling. *Wikipédia* (cf. p. 98).

Wikipédia. (2020f). Charrette (expression). *Wikipédia* (cf. p. 98).

Wikipédia. (2020g). Coefficient de Gini. *Wikipédia* (cf. p. 24)
Page Version ID : 174722795.
Wikipédia. (2020h). Géomatique. *Wikipédia* (cf. p. 96).
Wikipédia. (2020i). Ligne B du tramway de Bordeaux. *Wikipédia* (cf. p. 54).
Wikipédia. (2020j). Opération d'intérêt national. *Wikipédia* (cf. p. 55)
Page Version ID : 169074591.
Wikipédia. (2020k). Système d'information géographique. *Wikipédia* (cf. p. 96).
Wikipedia. (2020). History of Urban Planning. *Wikipedia* (cf. p. 50)
Page Version ID : 968302429.
Wilson, A. G. (1998). Land-Use/Transport Interaction Models : Past and Future. *Journal of Transport Economics and Policy*, *32*(1), 3-26 (cf. p. 77, 78).
Winograd, T. (2006). Shifting viewpoints : Artificial intelligence and human–computer interaction. *Artificial Intelligence*, *170*(18), 1256-1258. https://doi.org/10.1016/j.artint.2006.10.011 (cf. p. 90)
Wold, S., Esbensen, K. & Geladi, P. (1987). Principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *2*(1), 37-52. https://doi.org/10.1016/0169-7439(87)80084-9 (cf. p. 90)
Wolfe, C. (2019). Why Urban History [Still] Matters. (Cf. p. 10).
Wolman, A. (1965). The metabolism of cities. *Scientific American*, *213*(3), 179-190 (cf. p. 113, 117).
Yeung, K. Y. & Ruzzo, W. L. (2000). *An Empirical Study on Principal Component Analysis for Clustering Gene Expression Data* (Technical Report UW-CSE-2000-11-03). Department of Computer Science & Engineering, University of Washington. Seattle. (Cf. p. 120).
Yoo, C., Im, J., Park, S. & Quackenbush, L. J. (2018). Estimation of Daily Maximum and Minimum Air Temperatures in Urban Landscapes Using MODIS Time Series Satellite Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *137*, 149-162. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.01.018 (cf. p. 214)
Yuan, F. & Bauer, M. E. (2007). Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*, *106*(3), 375-386. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003 (cf. p. 214, 215)
Zhan, Q., Meng, F. & Xiao, Y. (2015). Exploring the Relationships of between Land Surface Temperature, Ground Coverage Ratio and Building Volume Density in an Urbanized Environment. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XL-7/W3*, 255-260. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-255-2015 (cf. p. 215)
Zhang, H., Chen, W. & Huang, W. (2016). TIMES Modelling of Transport Sector in China and USA : Comparisons from a Decarbonization Perspective. *Applied Energy*, *162*, 1505-1514. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.124 (cf. p. 194)
Zhang, Z. (2019). Understand Data Normalization in Machine Learning. (Cf. p. 119).
Zhao, P., Diao, J. & Li, S. (2017). The Influence of Urban Structure on Individual Transport Energy Consumption in China's Growing Cities. *Habitat International*, *66*(Supplement C), 95-105. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.06.001 (cf. p. 309)

ZUINDEAU, B. (2006). Le développement durable – une perspective pour le XXIe siècle, Sous la direction de Jean-Paul Maréchal et Béatrice Quenault, 2005, Rennes, Presses universitaires de Rennes, 422 pages. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie* (cf. p. 33, 36).

Annexes

Annexe A

Des villes en compétition les unes avec les autres

Cette annexe dresse rapidement la situation internationale et nationale de la compétition que se luttent les villes. Nous n'avons pas inclus cette partie dans le manuscrit pour ne pas alourdir la présentation des enjeux mais cette problématique est prise en compte par les collectivités territoriales dans leur activité et leur planification.

Les villes sont en concurrence les unes avec les autres pour attirer les entreprises, la main d'œuvre et les investissements, cette définition pouvant être élargie à la capacité de « retenir les *facteurs mobiles* de production » ou humains [Poirot, Jacques and Gérardin, Hubert (2010) et Thisse et Van Ypersele (1999)]. Ce fait n'est pas inédit au début du XXI^{ème} siècle, les villes l'ont toujours été de façon plus ou moins intense et directe mais la globalisation et l'intégration européenne ont relancé récemment cette compétition [Beuze Edragas et Bouron (2019), Cheshire (1999), Gospodini, Aspa (2002), Morel-Journel et Pinson (2013) et Thisse et Van Ypersele (1999)]. Les États Nations pouvaient avant cela contrôler la concurrence interne et gérer la distribution géographique des spécialités, et y avaient intérêt pour éviter la perte d'efficacité que peut engendrer une compétition entre villes [Cheshire (1999)] tandis qu'il y a plutôt un désengagement aujourd'hui, avec plus de responsabilités dévolues aux villes [Snieska et Zykiene (2015)] ou aux régions [Thisse et Van Ypersele (1999)]. La notion d'attractivité peut être également restreinte au tourisme et est alors définie comme « l'ensemble des éléments d'une destination qui attirent des visiteurs hors de leur environnement habituel » [Boivin et Tanguay (2019)]. L'impact potentiel de cette attraction sur le développement économique est connu depuis les années 90 par la mise en évidence d'une stratégie de tourisme urbain et des ressources exploitables, bien que les effets du développement du tourisme dans une ville ne soient pas systématiquement positifs [Law (1992)].

Attirer entreprises, investissements, et habitants

En pratique, plusieurs méthodes peuvent être employées par les villes pour améliorer leur visibilité et inciter entreprises, capitaux et particuliers à s'installer sur leur sol.

Pour entreprises et capitaux, la mise en place de politiques d'incitations financières [1] (par la baisse de taxes locales) est le ressort le plus fréquemment cité pour l'attrait de nouvelles entreprises [Cheshire (1999) et Fisher et Peters (1998)] tandis qu'il peut être aussi pertinent de tenter d'inviter les entreprises à se développer localement. Poirot, Jacques and Gérardin, Hubert (2010) citent aussi « coût et qualification de la main-d'œuvre, infrastructure de transport ou de télécommunication, services aux entreprises disponibles, fournisseurs potentiels, marché suffisamment large [2] » [Snieska et Zykiene (2015)]. Le contexte actuel de la financiarisation grandissante de l'économie a accru l'intensité de la compétition entre les villes qui ne peuvent plus s'appuyer seulement sur leurs infrastructures et la géographie pour attirer des entreprises de plus en plus sensibles aux avantages locaux [Gospodini, Aspa (2002) et Thisse et Van Ypersele (1999)].

Les raisons de l'intérêt des habitants semblent très variées et transversales (par exemple, la présence d'emplois, de logements peu chers, d'écoles et d'équipements, l'accessibilité par le transport, l'ambiance, la « qualité de l'espace urbain », etc. [Gospodini, Aspa (2002)]). Les opportunités d'emplois mais aussi le contexte social local sont ainsi mentionnés [Daubigny et Lorot (2013)], tandis que Poirot, Jacques and Gérardin, Hubert (2010) préfèrent insister sur le principe que les citoyens soient en *capacité* d'être et d'agir (faisant référence aux *capabilities* développées par Sen et Nussbaum mentionnées précédemment). Kourtit et al. (2020) ont une approche originale sur le ressenti des citoyens en séparant *corps* (parties « visibles et tangibles ») et *âme* (« suprastructure invisible ») [3], ces deux dimensions étant fortement intriquées, l'une étant le support et la condition de la naissance de l'autre, l'autre influençant l'une par l'aménagement [Kourtit et al. (2020)].

Les deux dimensions (entreprises et capitaux d'une part, habitants d'autre part) sont liées de manière générale, les entreprises ont besoin d'une certaine main d'œuvre tandis que les habitants recherchent des emplois leur correspondant [Poirot, Jacques and Gérardin, Hubert (2010) et Snieska et Zykiene (2015)].

Quels moyens ? Marketing territorial, architecture, aménagement

Le pendant de ces démarches est l'apparition d'un *marketing territorial* afin de faire connaître le territoire et de mettre en avant les moyens mis en œuvre et les avantages locaux [Beuze Edragas et Bouron (2019) et Cheshire (1999)], par la mise à contribution de « techniques de la publicité et de la communication, issues du monde de l'entreprise. » Les campagnes peuvent être tournées vers les touristes étrangers ou vers les entreprises internationales mais également

1. L'efficacité de ces politiques n'avait pas été prouvé en 1999 d'après Cheshire, 1999. Elle reste d'ailleurs toujours en suspens, en particulier aux États-Unis [Maurer et al. (2017)]. Ces derniers ont été plus concernés par ces problématiques de concurrence entre villes que les Européens [Beuze Edragas et Bouron (2019)], peut-être à cause de la place de l'État dans la vie locale et du libéralisme dans la société. La réapparition de ces problématiques de compétition et d'incitations financières est plutôt récente en Europe. Quant à leur efficacité, des bilans d'institutions et d'agences de communication sont positifs mais il semblerait que la croissance économique des territoires ne puisse être influencée seulement par ces acteurs [Cheshire (1999)].

2. Inversement, Snieska et Zykiene (2015) citent les facteurs négatifs : « l'instabilité politique et macroéconomique, des taxes élevées et une forte corruption » (« *the political and macroeconomic instability, high tax rates and high levels of corruption* »).

3. Littéralement « *body* » et « *soul* » dans le texte [Kourtit et al. (2020)].

vers le territoire national, voire vers les électeurs afin de mettre en avant le bilan d'un mandat. Il est intéressant de noter que ces procédés, contrairement aux incitations pour entreprises *a priori*, peuvent avoir un effet *performatif* sur les territoires, les opérations de communication finissant par influencer les opérations d'aménagement [Beuze Edragas et Bouron (2019)]. Il faut dans tous les cas, pour bien attirer des entreprises ou des individus, connaître le public visé et procéder à ses campagnes de communication au bon moment [Vermeylen (2012)].

De manière générale, l'urbanisation et les choix d'aménagement sont également des moyens d'actions spatiales mis à contribution par une ville [Gospodini, Aspa (2002)], soit dans une démarche d'amélioration générale des conditions de vie du territoire (par exemple par une mixité fonctionnelle qui diminue les déplacements et facilite la vie locale), soit par la cristallisation de « *clusters* » ou « *pôles de compétitivité* » sur son territoire [Poirot, Jacques and Gérardin, Hubert (2010)]. L'aménagement et la création d'espaces pour ses habitants et les entreprises sont rendus difficiles, en particulier en Europe, par la densité importante des grandes villes, la dynamique démographique, les coûts des fonciers et les enjeux climatiques [Kourtit et al. (2020)]. L'investissement dans des quartiers innovants (par exemple « durables »[4]) comme démonstrateurs de la qualité de vie, pour réhausser l'opinion public sur la densité [Emelianoff (2004)]. Certaines villes, quelle que soit leur taille, peuvent également chercher l'effet *Bilbao* ou *Guggenheim*, effet largement médiatisé, qui tire son nom de la ville espagnole qui a connu un regain d'attrait à l'international suite à la construction du musée Guggenheim par l'architecte Frank Gehry[5]. Gospodini, Aspa (2002) questionne l'efficacité de cette mesure en pointant notamment le risque de dissolution de l'identité culturelle et de l'héritage local, bien que l'emploi d'architecture ou d'urbanisation « d'avant-garde » semble toutefois un des moyens utilisables par des villes de taille moyenne pour améliorer leur attractivité.

Grandes et petites villes ne jouent pas le même jeu

On voit se dessiner une distinction supplémentaire entre grandes et petites villes, les premières disposant de plusieurs pistes pour améliorer leur attractivité dans presque tous les domaines tandis que les secondes doivent faire preuve de plus d'innovation [Gospodini, Aspa (2002)]. Beuze Edragas et Bouron (2019) mettent ainsi en avant l'existence d'une compétition entre « *collectivités de même échelon* ». Le fait d'opérer la transition économique d'une ville, par exemple en accueillant une part plus importante d'entreprises de services non productrices,

4. Emelianoff (2004) remarque que ce terme est parfois employé de façon « *abusive* ».

5. L'idée sous-jacente de ce phénomène serait que la construction et l'ouverture d'un bâtiment exceptionnel rendent la ville unique et reconnaissable à l'international, augmentent le dynamisme de leur ville et attirent touristes et investisseurs. Ce bâtiment peut être de toute sorte, comme une tour mixte (comme la compétition des tours les plus hautes du monde [Baranton (2020), Glancey (2015) et Michaelson (2014)]), un stade ou bâtiment sportif (une piscine, un grand gymnase), un musée, une bibliothèque, etc. [Moore (2017)] Des élus peuvent souhaiter laisser ainsi une trace de leur mandat ou bien croire à l'efficacité d'un tel investissement (généralement très important). Cet effet intervient parfois réellement mais il n'est pas du tout systématique, d'autres investissements semblant plus judicieux qu'une énorme dépense pour un bâtiment bien souvent plus ostentatoir qu'utile et pertinent pour les besoins locaux [Ponzini (2010)]. Concernant Bilabo par exemple, il est difficile d'isoler le regain d'intérêt montré pour la ville alors en déclin au moment de la construction du musée puisque d'importantes réformes avaient également été lancées en même temps, comme une ligne de métro et de nouvelles bibliothèques municipales [Heathcote et Vicario (2017)].

peut avoir des inconvénients pour des villes plus modestes qui auraient tenté de suivre le mouvement général : la crise économique a ainsi plus durement touché les villes « *globalisées* » ou « *dans la course* » que celles pouvant être vues comme non modernisées [Vermeylen (2012)]. Un autre risque de l'attraction croissante d'habitants et de capitaux est l'apparition de facteurs négatifs liés à la taille [6] comme les embouteillages, la saturation plus générale des infrastructures, les nuisances (sonores, olfactives, etc.), la pollution, l'anonymisation, la perte du lien social… [Gospodini, Aspa (2002)] effets pas mécaniques selon Thisse et Van Ypersele, 1999 [7]. On assiste en fait, avec cette nécessité pour les villes de rentrer *de facto* dans une lutte compétitive, à une forme de *métropolisation* [8] [Beuze Edragas et Bouron (2019) et Thisse et Van Ypersele (1999)], le marketing ayant de manière générale un impact sur les territoires environnant les villes concernées. Snieska et Zykiene (2015) voient également un effet de cycle auto entretenu dans ces mécanismes, l'attrait fixant de nouveaux entrants qui renforcent les raisons de leur venue. Ces réflexions invitent à des réflexions plus larges sur la planification globale d'une métropole sur le rapport entre le cœur, les communes satellites ou périphériques, et les autres intercommunalités voisines [Daubigny et Lorot (2013)].

Apparaît également un besoin de différencier les offres en fonction des spécificités régionales, afin de rendre un territoire plus visible, plus attractif, particulièrement en dehors du pays [Thisse et Van Ypersele (1999) et Vermeylen (2012)]. Cet objectif semble toutefois presque nié par une uniformisation des campagnes de communication et des avantages mis en avant par les acteurs dans les faits [Beuze Edragas et Bouron (2019)]. Vermeylen (2012) et Gospodini, Aspa (2002) précisent que seules les mégalopoles les plus importantes peuvent ne pas chercher la spécialisation de leurs atouts pour se différencier sur la scène nationale ou internationale parce qu'elles « peuvent prétendre à la domination par l'addition des avantages » [Vermeylen (2012)] ou bien ignorer la « volatilité du capital » [Gospodini, Aspa (2002)].

Comment évaluer la réussite de ces politiques ?

Il existe de nombreux classements d'attractivité des villes comparant divers indicateurs quantitatifs sur la qualité de vie, les conditions économiques favorables (dont effets de cluster, connexions internationales, initiatives locales) et d'autres [Ahvenniemi et al. (2017), Brun et Condis (2018) et Parakatil (2019)] mais la « réussite » de l'attractivité d'une ville est peut-être simplement visible à la liberté (au sens de *capacités*) [Poirot, Jacques and Gérardin, Hubert (2010)] ou

6. Rey suggère que les villes, comme toutes les constructions naturelles ou humaines – ou très probablement la plupart –, ont une *bonne* taille, c'est-à-dire une taille optimale au-dessus de laquelle le système perd en efficacité par sa trop grande étendue malgré les gains d'échelle et par l'apparition de nouveaux problèmes, et en-dessous de laquelle le système en tant qu'ensemble perd en dépenses d'énergies individuelles [Rey (2014)]. Cette vision semble correspondre ici au diagnostic posé par Gospodini, Aspa (2002) dans les risques qui pèsent sur la concentration dans de grandes métropoles [Gospodini, Aspa (2002)].

7. Cette étude date de la fin du XX^{ème} siècle et ses arguments pourraient avoir été invalidés par l'expérience des deux dernières décennies.

8. Cette *métropolisation* n'est qu'une des formes que l'on peut imaginer pour les villes dans le futur (cf. section III.1 du chapitre 1, p. 32) et le fait que la mondialisation, le libéralisme et les autres causes de ce mouvement *imposent* en quelque sorte cette mise en compétition des villes à la société. Le choix forcé d'évolution par le marché et non démocratiquement est gênant pour des sociétés se revendiquant démocratiques.

au bonheur de ses habitants qui résument indirectement l'ensemble des facteurs mentionnés. Ceux-ci sont en effet parfois simplement ignorés ou sciemment mis à l'écart des campagnes de communication ou des projets [Beuze Edragas et Bouron (2019)] alors qu'une participation des citoyens dans la gouvernance semble souhaitable [Kourtit et al. (2020)]. Morel-Journel et Pinson (2013) mettent également en garde contre un basculement de politiques au profit des « groupes sociaux les moins favorisés » à une concentration sur les « espaces les plus prisés par la spéculation immobilière ».

Pour conclure cette section sur l'attractivité, on voit que « les gouvernements des villes ne sont plus conçus comme des machines à produire des services à la population dans un contexte idéologique favorable à la réduction des inégalités sociales et spatiales, mais comme des entités porteuses d'un projet, d'une stratégie » [Morel-Journel et Pinson (2013)]. Ce constat suppose l'existence d'outils d'aide à la mise en place de telles stratégies et renforce les conclusions du chapitre 1 sur la place pour des approches telles que celle proposée dans cette thèse.

Annexe B

Quelques éléments réglementaires sur la ville de Bordeaux

On peut analyser le cas de la ville de Bordeaux. Celle-ci est incluse dans la Métropole de Bordeaux [1] (forme d'intercommmunalité la plus large), dans le département de la Gironde, dans la région Nouvelle-Aquitaine. Nous regarderons ici très succinctement le contenu du PLUi. Institutionnellement, celui-ci est contraint par les plans nationaux et régionaux.

Le Plan Local d'Urbanisme Intercommunal

La Métropole de Bordeaux (alors CUB) a mis en place un PLUi. La partie la plus explicite est le résumé non technique qui rassemble un portrait général du territoire, de ses dynamiques dans l'ensemble des secteurs. Le document met par exemple en évidence les filières économiques locales principales que sont les activités tertiaires supérieures (dont beaucoup d'employeurs publics), le tourisme, le vin, l'aéronautique et la défense, etc. Le PLUi s'attarde aussi sur l'évolution de la population et la hausse des déplacements par jour et par personne (10% d'augmentation en 10 ans contre 8% d'augmentation de la population), sur les capacités d'épuration théorique (environ 1,156 millions d'équivalents-habitants), l'organisation paysagères de la métropole avant de détailler les objectifs généraux. Sont ainsi mentionnés la sobriété énergétique (du bâti en particulier), l'accroissement de la production décentralisée d'énergies renouvelables, le développement de réseaux de chaleur, le développement du transport fluvial ou ferroviaire pour les biens, l'augmentation des efforts dans la rénovation des logements, etc. Le lien est également fait entre les orientations, en partie citées précédemment, et le zonage également accessible dans le PLUi : « *la traduction du projet d'aménagement a conduit à la définition de près de 200 zones (urbaines, naturelles et agricoles), ce qui est cohérent avec la diversité des situations métropolitaines et la contextualisation souhaitée par les élus communaux.* » Les zones ainsi définies se répartissent entre zones naturelles, agricoles (qui représentent plus de la moitié de la superficie de la métropole), urbaines multifonctionnelles (dont les « *centralités anciennes* », « *tissus*

1. Anciennement appelée Communauté urbaine de Bordeaux (ou CUB), ce nom peut encore apparaître sur certains documents non mis-à-jour depuis le changement au 1er janvier 2015.

à dominante d'échoppes, faubourgs et maisons de ville », « *tissus à dominante de grands ensembles et tissus mixtes* », « *tissus à dominante de maisons individuelles récentes* »…), urbaines spécifiques ou particulières, et enfin, zones à urbaniser.

Le PLUi fait également un bilan de l'état de l'environnement, par définir les zones naturelles principales et lister les bâtiments inscrits ou classés et les sites archéologiques avant d'évaluer les ressources en eau disponibles et leur utilisation, ainsi que les capacités actuelles d'assainissement (collectif ou particuliers). Il fixe également les objectifs en termes de lutte contre l'émission de GES ou surconsommation de l'énergie en se référant pour cela aux lois et autres documents dans lesquelles le PLUi s'inscrit. Par exemple, il cite la loi Grenelle de 2010 et le SRCAE de la région Aquitaine :

> *Les objectifs fixés par le scénario de référence du SRCAE d'Aquitaine sont les suivants :*
>
> 1. *Une réduction de 28,5 % des consommations énergétiques finales d'ici 2020 par rapport à celles de 2008 ;*
> 2. *Une production des énergies renouvelables équivalente à 25,4 % de la consommation énergétique finale en 2020 ;*
> 3. *Une réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2020 par rapport à celles de 1990 ;*
> 4. *Une réduction des émissions de polluants atmosphériques, dont les oxydes d'azote et les particules en suspension.*

Ainsi, un bilan énergétique et des émissions de gaz à effet de serre (ou **GES**) est dressé, constatant ainsi que « les émissions globales du territoire de Bordeaux Métropole ont été estimées à 4 765 000 $t_{eq}CO_2$, soit environ 6,7 $t_{eq}CO_2$ par habitant et par an, sur la base des données de 2007. Pour cette même année, la moyenne nationale était estimée à 6 $t_{eq}CO_2$ ». Cet état initial continue en étudiant l'équilibre des matériaux de construction, la gestion des déchets, la qualité de l'air, les nuisances sonores, les sols pollués, etc. Cette étude est complétée par un *diagnostic intercommunal* qui se penche sur les besoins en locaux d'ici à 2020 (échéance du PLUi) en réfléchissant notamment sur l'évolution de l'emploi, le stationnement… autant de problématiques pertinentes à considérer dans la construction de scénarios. Les parties suivantes dressent une carte des différentes *situations urbaines* (une forme d'analyse des formes urbaines telle que nous le ferons dans le chapitre suivant) et des portraits des communes de la métropole.

Le PLUi contient ensuite un règlement que l'on peut séparer en trois parties pour chacune des zones définies plus tôt : les fonctions urbaines (répartition entre activités, logements, etc.) – stipulant les occupations et utilisations des sols interdites ou soumises à conditions particulières, la morphologie urbaine (les reculs, les retraits, l'emprise au sol, les hauteurs - de façade ou totale…) et enfin la desserte par les réseaux et services urbains (taille et nombre d'accès, servitudes de passage, assainissement, connexions aux réseaux).

Le PLUi comprend également le *Projet d'aménagement et de développement durables* (ou **PADD**). Parmi les objectifs mentionnés, on retrouve des éléments très inté-

ressants pour notre approche sur la limitation de l'artificialisation des sols et l'utilisation en général des terrains.

> *D'une manière globale, l'objectif est de maintenir les limites de la ville dessinées dans le PLUi de 2006, avec des adaptations à la marge qui représentent moins de 2 % des 58 000 ha du territoire communautaire. Outre la stabilisation du contour de la zone urbaine, le projet s'attache ainsi à préserver l'équilibre proche de 50 % entre les territoires artificialisés et ceux qui n'ont pas vocation à l'être, dans un objectif de lutte contre l'étalement urbain.*

De plus, la tendance démographique est développée et les objectifs d'accueil et de nouveaux logements sont explicités :

> *Le PLUi développe les moyens nécessaires pour le maintien de la population actuelle sur son territoire en évitant les départs contraints pour raisons économiques et pour l'accueil de 230 000 habitants supplémentaires d'ici 2030, par construction neuve et par réhabilitation des logements.*

Il faut savoir que parmi l'ensemble des éléments du PLUi, tous ne sont pas opposables (les diagnostics et le rapport de présentation par exemple ne le sont pas). Néanmoins, les Orientations d'Actions et de Programmation (ou **OAP**) font partie des pièces contraignantes : par opposable on entend que tout autre plan, autorisation, permis, opération doit être compatible avec les OAP. Ces OAP peuvent concerner tous les éléments pertinents (dans le respect du code de l'urbanisme) à préserver, à inclure dans un projet, liés à l'aménagement global de la ville, au respect du contexte dans laquel s'inscrit un projet et d'autres propositions. En complément de ces OAP existent des Programmes d'Orientations et d'Actions (ou **POA**) détaillant les plans d'actions pour l'habitat et la mobilité [2].

Le PLUi a un chapitre complet sur la vérification exhaustive de la bonne articulation avec le SCoT et le SRCAE.

Le Plan d'action Haute Qualité de Vie pour un territoire durable (faisant office de PCAET)

Plus récent que le PLUi (qui a été fréquemment modifié ou révisé au cours de la dernière décennie selon les situations), ce document a été introduit en juin 2017. Largement médiatisé, il comporte trois axes, déclinés en objectifs et actions, à savoir :

1. Accélérer la transition énergétique pour faire de Bordeaux métropole une des premières métropoles à énergie positive en 2050
2. Préserver et valoriser les 50% d'espaces naturels, agricoles et forestiers
3. Accompagner tous les acteurs vers la transition énergétique et écologique

2. On pourra avoir plus d'explication sur les OAP et les POA sur le site de la métropole de Strasbourg : https://www.strasbourg.eu/orientations-amenagement-programmation-programmes-orientations-actions (consulté le 29 septembre 2020).

Annexe C

Données relatives aux 277 IRIS de la métropole bordelaise

Cette annexe affiche une partie des nombreuses données disponibles et regroupées pour les 277 IRIS de la métropole bordelaise. Plus de détails sont disponibles en contact l'auteur de cette thèse.

Code IRIS	***IRIS***	***Commune***	*Aire (km²)*	*Population*	*Nb de logements*	*% de maisons parmi les logements*	*% de chauffage central collectif parmi les résidences principales*	*% de menages ayant une voiture ou plus*	*Ecoles du secondaire*	*Consommation total d'électricité par le secteur résidentiel*	*Nb d'étages moyens*	*Pourcentage d'aire végétalisée par rapport à l'aire de la zone*	*Densité moyenne d'emplois par m² de bâti*	*Proportion de bâtiments construits avant 1915*
330030101	**Chemin de la Vie**	**Ambarès-et-Lagrave**	12,301	4 429,631	1 850,953	0,898	0,006	0,955	1,000	26 533,407	1,745	0,376	0,027	0,126
330030102	**Lagrave-Le Bourg**	**Ambarès-et-Lagrave**	4,356	3 308,779	1 530,963	0,699	0,003	0,894	3,000	17 576,621	1,885	0,274	0,505	0,236
330030103	**Sabaeges**	**Ambarès-et-Lagrave**	4,469	2 904,793	1 160,472	0,765	0,089	0,862	1,000	6 253,540	1,753	0,254	0,090	0,133
330030104	**Parabelle**	**Ambarès-et-Lagrave**	2,197	3 965,798	1 567,461	0,869	0,001	0,931	6,000	9 582,809	1,720	0,127	0,088	0,099
330040000	**Ambès**	**Ambès**	16,739	3 209,000	1 410,563	0,784	0,009	0,907	0,000	7 003,418	2,078	0,270	0,136	0,135
330130101	**Nord**	**Artigues-près-Bordeaux**	3,761	3 959,539	1 771,088	0,772	0,006	0,950	0,000	10 824,536	1,907	0,184	0,035	0,023
330130104	**Sud**	**Artigues-près-Bordeaux**	3,488	3 861,461	1 712,232	0,725	0,026	0,966	0,000	20 891,014	1,954	0,291	0,110	0,027
330320101	**Nord**	**Bassens**	1,793	2 594,000	1 137,816	0,663	0,168	0,837	0,000	5 782,584	1,903	0,323	0,022	0,082
330320102	**Centre**	**Bassens**	0,832	2 346,000	1 068,958	0,584	0,011	0,842	0,000	3 951,997	2,151	0,132	0,016	0,039
330320103	**Sud**	**Bassens**	1,260	1 871,000	840,779	0,780	0,006	0,905	0,000	3 619,807	1,990	0,314	0,023	0,083
330320104	**Ouest-Zones d'Activites-Quais**	**Bassens**	5,266	180,000	81,236	0,937	0,000	0,888	0,000	873,304	3,738	0,148	0,235	0,103
330390101	**La Castagne-La Ferrade**	**Bègles**	0,463	3 146,626	1 590,998	0,783	0,008	0,855	2,000	6 361,072	2,059	0,060	0,069	0,367
330390102	**La Raze**	**Bègles**	0,715	3 530,960	1 675,498	0,770	0,010	0,905	3,000	6 741,560	1,809	0,066	0,083	0,254
330390103	**Centujean**	**Bègles**	0,644	2 616,413	1 279,499	0,737	0,005	0,857	1,000	5 318,251	1,794	0,060	0,040	0,355
330390104	**Sembat**	**Bègles**	1,325	3 853,474	2 128,498	0,436	0,086	0,814	3,000	15 392,893	2,186	0,063	0,586	0,153
330390105	**Birambits**	**Bègles**	1,871	3 705,569	2 052,998	0,420	0,108	0,869	3,000	15 469,222	1,888	0,402	0,026	0,093

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
330390106	**Le Preche**	**Bègles**	0,321	1 371,338	685,499	0,200	0,388	0,682	0,000	3 955,286	2,291	0,051	0,014	0,050
330390107	**Mairie Bourg**	**Bègles**	0,650	3 043,603	1 332,998	0,672	0,024	0,881	3,000	6 003,661	1,930	0,090	0,040	0,111
330390108	**Argous**	**Bègles**	0,520	2 328,516	1 326,498	0,447	0,508	0,738	2,000	4 203,135	1,851	0,101	0,045	0,088
330390109	**Dorat Verduc**	**Bègles**	1,153	2 507,501	1 111,999	0,355	0,462	0,710	1,000	2 975,367	1,988	0,214	0,015	0,059
330390110	**Zone d'Activite**	**Bègles**	2,182	0,000	3,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000	2,496	0,200	0,003	0,005
330560101	**Marnieres**	**Blanquefort**	8,745	2 977,411	1 137,012	0,987	0,000	0,961	2,000	8 168,945	1,707	0,581	0,863	0,107
330560102	**Caychac Bourg**	**Blanquefort**	2,355	2 147,065	997,011	0,748	0,129	0,919	0,000	5 419,066	1,586	0,356	0,060	0,126
330560103	**Majolan**	**Blanquefort**	2,488	3 137,055	1 544,517	0,215	0,645	0,823	4,000	4 988,859	1,955	0,325	0,122	0,026
330560104	**Centre Ville**	**Blanquefort**	1,881	3 978,083	1 922,520	0,459	0,037	0,914	4,000	7 890,152	1,883	0,148	0,052	0,099
330560105	**Saturne**	**Blanquefort**	1,444	2 521,446	1 032,511	0,968	0,021	0,949	6,000	6 496,851	1,609	0,207	0,033	0,083
330560106	**Zone Industrielle**	**Blanquefort**	3,401	457,737	156,569	1,000	0,000	0,981	0,000	1 927,269	2,379	0,164	0,432	0,025
330560107	**Bords de Garonne**	**Blanquefort**	10,618	78,204	23,433	1,000	0,000	1,000	0,000	147,646	2,167	0,162	0,010	0,482
330630101	**Le Lac 1**	**Bordeaux**	7,956	161,600	439,585	0,003	0,840	0,885	0,000	3 050,127	3,279	0,287	0,843	0,009
330630103	**Le Lac 3**	**Bordeaux**	0,908	4 354,388	1 618,501	0,029	0,902	0,597	6,000	3 420,631	5,684	0,243	2,379	0,000
330630201	**Bacalan 1**	**Bordeaux**	2,999	605,849	476,538	0,488	0,051	0,808	1,000	5 130,465	2,220	0,152	0,989	0,049
330630202	**Bacalan 2**	**Bordeaux**	0,641	3 127,915	1 486,781	0,561	0,139	0,792	4,000	9 930,446	2,192	0,027	2,813	0,215
330630203	**Bacalan 3**	**Bordeaux**	0,443	2 609,922	1 324,001	0,690	0,032	0,715	1,000	4 418,309	1,974	0,052	0,011	0,090
330630204	**Bacalan 4**	**Bordeaux**	0,621	1 458,862	793,001	0,166	0,674	0,621	0,000	1 751,231	2,501	0,134	0,085	0,017
330630301	**Chartrons-Grand-Parc 1**	**Bordeaux**	0,543	4 473,002	2 797,002	0,132	0,104	0,648	3,000	10 850,439	3,557	0,012	0,143	0,290
330630302	**Chartrons-Grand-Parc 2**	**Bordeaux**	0,351	3 938,699	2 447,661	0,086	0,054	0,634	4,000	10 133,936	4,264	0,002	0,103	0,456
330630303	**Chartrons-Grand-Parc 3**	**Bordeaux**	0,369	3 458,455	2 072,501	0,084	0,168	0,701	1,000	7 522,401	3,043	0,029	0,449	0,079
330630305	**Chartrons-Grand-Parc 5**	**Bordeaux**	0,267	2 991,841	1 656,501	0,000	0,757	0,557	3,000	5 468,476	7,656	0,117	0,206	0,000
330630306	**Chartrons-Grand-Parc 6**	**Bordeaux**	0,230	2 453,690	1 219,001	0,109	0,843	0,661	1,000	2 593,392	5,678	0,155	0,031	0,033

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
330630307	**Chartrons-Grand-Parc 7**	**Bordeaux**	0,240	2 953,224	1 621,001	0,137	0,351	0,678	1,000	4 386,300	3,753	0,088	0,456	0,187
330630308	**Chartrons-Grand-Parc 8**	**Bordeaux**	0,193	2 503,130	1 112,001	0,084	0,796	0,576	1,000	2 493,827	5,064	0,103	0,056	0,089
330630309	**Chartrons-Grand-Parc 9**	**Bordeaux**	0,233	2 268,630	1 583,001	0,033	0,027	0,644	0,000	5 832,654	5,271	0,022	0,065	0,741
330630310	**Chartrons-Grand-Parc 10**	**Bordeaux**	0,186	2 610,273	1 536,001	0,238	0,036	0,706	2,000	5 771,438	3,889	0,036	0,087	0,565
330630311	**Chartrons-Grand-Parc 11**	**Bordeaux**	0,131	2 249,745	1 586,001	0,097	0,009	0,638	0,000	6 608,345	4,564	0,000	0,047	0,711
330630312	**Chartrons-Grand Parc 12**	**Bordeaux**	0,362	3 087,090	1 842,664	0,256	0,167	0,715	3,000	6 249,963	3,131	0,017	0,358	0,279
330630313	**Chartrons-Grand Parc 13**	**Bordeaux**	0,504	3 392,406	2 089,501	0,031	0,203	0,733	3,000	12 355,005	3,456	0,032	0,179	0,015
330630401	**La Bastide 1**	**Bordeaux**	2,298	4 061,285	2 104,501	0,184	0,159	0,716	3,000	13 144,169	3,031	0,070	0,047	0,170
330630402	**La Bastide 2**	**Bordeaux**	0,291	2 439,459	1 437,001	0,419	0,024	0,735	5,000	5 328,257	2,700	0,052	1,469	0,626
330630403	**La Bastide 3**	**Bordeaux**	0,609	3 704,152	1 962,001	0,636	0,011	0,806	2,000	8 077,557	2,208	0,037	0,030	0,270
330630404	**La Bastide 4**	**Bordeaux**	0,298	2 910,480	1 229,001	0,049	0,808	0,576	2,000	2 275,728	3,850	0,159	0,009	0,019
330630405	**La Bastide 5**	**Bordeaux**	1,264	3 189,639	1 918,001	0,347	0,023	0,713	5,000	15 059,719	2,637	0,080	0,022	0,443
330630501	**Hotel de Ville-Quinconces 1**	**Bordeaux**	0,227	2 804,829	1 944,501	0,032	0,126	0,433	4,000	7 132,573	5,316	0,041	0,336	0,813
330630502	**Hotel de Ville-Quinconces 2**	**Bordeaux**	0,170	4 847,397	3 421,502	0,007	0,085	0,431	0,000	12 562,568	6,622	0,014	0,074	0,894
330630503	**Hotel de Ville-Quinconces 3**	**Bordeaux**	0,145	2 215,286	1 592,501	0,010	0,077	0,458	0,000	5 697,768	6,536	0,009	0,057	0,699
330630504	**Hotel de Ville-Quinconces 4**	**Bordeaux**	0,133	2 202,974	1 781,001	0,003	0,013	0,439	2,000	6 447,681	6,801	0,004	0,052	0,918

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
330630505	**Hotel de Ville-Quinconces 5**	**Bordeaux**	0,142	2 797,867	2 174,501	0,004	0,022	0,443	0,000	8 514,539	7,024	0,023	0,173	0,908
330630506	**Hotel de Ville-Quinconces 6**	**Bordeaux**	0,179	2 994,839	2 181,001	0,049	0,036	0,540	0,000	9 079,685	5,372	0,048	0,017	0,734
330630507	**Hotel de Ville-Quinconces 7**	**Bordeaux**	0,413	2 320,858	1 752,755	0,015	0,081	0,637	3,000	7 347,206	7,165	0,188	0,073	0,927
330630508	**Hotel de Ville-Quinconces 8**	**Bordeaux**	0,178	2 297,068	1 887,001	0,005	0,032	0,398	1,000	6 627,329	5,543	0,070	0,999	0,899
330630601	**Saint-Seurin-Fondaudege 1**	**Bordeaux**	0,251	2 990,780	1 790,501	0,331	0,014	0,723	2,000	6 549,528	3,496	0,073	0,037	0,521
330630602	**Saint-Seurin-Fondaudege 2**	**Bordeaux**	0,265	2 127,983	1 316,001	0,254	0,013	0,766	1,000	5 342,792	4,369	0,246	0,024	0,733
330630603	**Saint-Seurin-Fondaudege 3**	**Bordeaux**	0,290	2 136,631	1 381,501	0,257	0,078	0,765	0,000	4 704,140	3,483	0,220	0,502	0,169
330630604	**Saint-Seurin-Fondaudege 4**	**Bordeaux**	0,248	2 823,157	1 509,501	0,383	0,014	0,717	2,000	5 054,633	3,379	0,119	0,076	0,707
330630605	**Saint-Seurin-Fondaudege 5**	**Bordeaux**	0,215	2 581,114	1 775,001	0,174	0,109	0,572	2,000	5 781,983	4,603	0,095	0,136	0,669
330630606	**Saint-Seurin-Fondaudege 6**	**Bordeaux**	0,266	2 540,788	1 187,501	0,449	0,009	0,768	5,000	4 202,305	3,305	0,049	0,083	0,461
330630607	**Saint-Seurin-Fondaudege 7**	**Bordeaux**	0,166	2 590,672	1 587,001	0,255	0,016	0,648	2,000	6 009,857	3,667	0,064	0,010	0,619
330630608	**Saint-Seurin-Fondaudege 8**	**Bordeaux**	0,337	3 011,511	1 634,501	0,478	0,086	0,806	1,000	5 608,509	3,642	0,105	0,078	0,575
330630609	**Saint-Seurin-Fondaudege 9**	**Bordeaux**	0,245	3 143,467	1 806,501	0,291	0,058	0,727	3,000	6 534,979	3,873	0,126	0,128	0,495

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
330630701	**Villa Primerose Parc Bor.-Cauderan 1**	**Bordeaux**	0,361	2 629,219	1 427,001	0,490	0,120	0,876	0,000	5 351,026	2,247	0,128	0,602	0,052
330630702	**Villa Primerose Parc Bor.-Cauderan 2**	**Bordeaux**	0,780	3 463,778	1 835,501	0,453	0,120	0,854	3,000	7 034,904	3,178	0,393	0,025	0,189
330630703	**Villa Primerose Parc Bor.-Cauderan 3**	**Bordeaux**	0,313	2 512,132	1 276,001	0,535	0,043	0,882	4,000	5 154,410	2,792	0,109	0,025	0,253
330630704	**Villa Primerose Parc Bor.-Cauderan 4**	**Bordeaux**	0,473	2 936,200	1 724,001	0,401	0,055	0,804	4,000	7 127,921	2,734	0,136	0,033	0,116
330630705	**Villa Primerose Parc Bor.-Cauderan 5**	**Bordeaux**	0,628	3 712,312	2 106,501	0,435	0,014	0,846	4,000	8 514,177	2,970	0,127	0,060	0,244
330630706	**Villa Primerose Parc Bor.-Cauderan 6**	**Bordeaux**	0,334	2 609,119	1 611,001	0,301	0,006	0,835	1,000	6 134,120	2,727	0,128	0,058	0,073
330630801	**Lestonat-Monsejour 1**	**Bordeaux**	0,546	2 449,261	1 486,001	0,346	0,047	0,869	4,000	6 021,216	3,020	0,161	0,332	0,071
330630802	**Lestonat-Monsejour 2**	**Bordeaux**	0,565	2 603,039	1 481,001	0,289	0,244	0,763	5,000	5 201,551	2,545	0,123	0,073	0,019
330630803	**Lestonat-Monsejour 3**	**Bordeaux**	0,412	2 571,956	1 690,001	0,146	0,010	0,899	0,000	11 195,882	2,090	0,217	0,223	0,014
330630804	**Lestonat-Monsejour 4**	**Bordeaux**	0,379	2 183,296	1 259,501	0,280	0,014	0,884	2,000	4 638,030	2,883	0,178	0,134	0,076
330630805	**Lestonat-Monsejour 5**	**Bordeaux**	0,524	2 800,304	1 507,501	0,351	0,004	0,827	0,000	6 020,329	1,921	0,083	0,085	0,033

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
330630806	**Lestonat-Monsejour 6**	**Bordeaux**	0,442	2 166,437	1 174,501	0,605	0,093	0,868	2,000	4 911,643	2,553	0,141	0,016	0,102
330630807	**Lestonat-Monsejour 7**	**Bordeaux**	0,398	1 933,237	928,501	0,480	0,080	0,887	1,000	2 871,030	1,883	0,089	0,193	0,002
330630808	**Lestonat-Monsejour 8**	**Bordeaux**	0,437	2 816,903	1 675,501	0,236	0,430	0,881	0,000	5 047,021	2,053	0,093	0,016	0,010
330630809	**Lestonat-Monsejour 9**	**Bordeaux**	1,085	3 083,540	1 513,501	0,596	0,052	0,920	0,000	7 926,641	1,968	0,114	0,034	0,021
330630901	**Saint-Augustin 1**	**Bordeaux**	0,761	2 204,192	1 052,501	0,327	0,217	0,623	1,000	2 060,378	2,841	0,099	1,018	0,048
330630902	**Saint-Augustin 2**	**Bordeaux**	0,304	3 402,122	2 040,001	0,253	0,124	0,780	1,000	6 766,366	2,446	0,108	0,023	0,080
330630903	**Saint-Augustin 3**	**Bordeaux**	0,603	3 704,774	2 090,001	0,464	0,151	0,698	4,000	7 355,051	2,842	0,111	0,908	0,297
330630904	**Saint-Augustin 4**	**Bordeaux**	0,353	2 968,102	1 994,218	0,407	0,153	0,737	2,000	6 576,453	2,671	0,064	0,031	0,286
330630905	**Saint-Augustin 5**	**Bordeaux**	0,400	2 692,338	1 481,001	0,605	0,022	0,799	3,000	5 561,517	2,605	0,078	0,019	0,354
330631001	**Saint-Bruno-Saint-Victor 1**	**Bordeaux**	0,325	3 532,466	2 159,001	0,419	0,087	0,658	1,000	7 514,524	2,957	0,064	0,036	0,586
330631002	**Saint-Bruno-Saint-Victor 2**	**Bordeaux**	0,291	1 379,564	1 193,785	0,027	0,100	0,554	5,000	3 982,065	6,446	0,097	0,975	0,230
330631003	**Saint-Bruno-Saint-Victor 3**	**Bordeaux**	0,622	3 815,282	2 781,321	0,230	0,008	0,650	3,000	9 202,077	2,958	0,078	0,721	0,213
330631004	**Saint-Bruno-Saint-Victor 4**	**Bordeaux**	0,306	4 471,403	2 986,502	0,196	0,033	0,591	2,000	11 047,362	3,508	0,101	0,101	0,493
330631005	**Saint-Bruno-Saint-Victor 5**	**Bordeaux**	0,239	2 821,327	2 142,467	0,117	0,086	0,574	1,000	14 392,456	3,924	0,030	0,194	0,360
330631006	**Saint-Bruno-Saint-Victor 6**	**Bordeaux**	0,281	2 353,986	1 472,001	0,464	0,028	0,701	2,000	5 728,010	2,936	0,083	1,726	0,562
330631101	**Capucins-Victoire 1**	**Bordeaux**	0,110	2 792,812	1 968,501	0,035	0,019	0,409	0,000	6 355,019	4,950	0,000	0,012	0,835
330631102	**Capucins-Victoire 2**	**Bordeaux**	0,105	2 647,098	2 052,001	0,022	0,030	0,368	3,000	6 817,719	5,975	0,026	0,028	0,738
330631103	**Capucins-Victoire 3**	**Bordeaux**	0,148	2 715,979	1 884,001	0,021	0,017	0,370	2,000	6 613,544	5,115	0,024	0,049	0,692

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
330631104	**Capucins-Victoire 4**	**Bordeaux**	0,173	3 025,094	2 361,501	0,017	0,003	0,371	3,000	7 849,312	5,949	0,016	0,027	0,820
330631105	**Capucins-Victoire 5**	**Bordeaux**	0,250	2 411,248	1 662,001	0,041	0,183	0,433	4,000	5 093,971	4,619	0,057	0,213	0,663
330631106	**Capucins-Victoire 6**	**Bordeaux**	0,130	3 020,029	2 433,001	0,071	0,006	0,359	2,000	6 869,726	3,556	0,022	0,324	0,642
330631107	**Capucins-Victoire 7**	**Bordeaux**	0,107	2 258,962	1 819,501	0,107	0,053	0,375	0,000	5 569,668	3,880	0,080	0,063	0,539
330631108	**Capucins-Victoire 8**	**Bordeaux**	0,214	2 534,108	1 917,479	0,113	0,093	0,405	2,000	6 301,116	3,654	0,062	0,342	0,618
330631201	**Nansouty 1**	**Bordeaux**	0,232	2 877,211	1 848,501	0,259	0,124	0,625	2,000	6 448,667	3,479	0,142	0,055	0,519
330631202	**Nansouty 2**	**Bordeaux**	0,357	2 912,420	1 628,001	0,354	0,132	0,642	10,000	4 762,410	3,208	0,128	0,726	0,341
330631203	**Nansouty 3**	**Bordeaux**	0,274	2 385,175	1 547,501	0,412	0,007	0,682	0,000	5 188,889	2,716	0,094	0,365	0,452
330631204	**Nansouty 4**	**Bordeaux**	0,244	3 096,351	2 172,951	0,239	0,083	0,607	3,000	6 303,170	2,882	0,071	0,223	0,237
330631205	**Nansouty 5**	**Bordeaux**	0,172	2 295,617	1 481,501	0,362	0,076	0,607	0,000	4 020,561	2,655	0,100	0,436	0,549
330631206	**Nansouty 6**	**Bordeaux**	0,292	2 112,697	1 201,001	0,599	0,057	0,751	2,000	4 425,120	2,613	0,046	0,071	0,712
330631207	**Nansouty 7**	**Bordeaux**	0,221	2 446,950	1 548,001	0,262	0,108	0,610	3,000	4 655,761	2,905	0,044	0,056	0,581
330631208	**Nansouty 8**	**Bordeaux**	0,319	2 869,320	1 622,001	0,305	0,260	0,736	0,000	4 715,716	2,545	0,072	0,211	0,372
330631209	**Nansouty 9**	**Bordeaux**	0,140	2 900,122	2 283,501	0,119	0,047	0,431	1,000	7 554,226	3,361	0,058	0,286	0,454
330631301	**Gare Saint-Jean 1**	**Bordeaux**	0,829	2 689,825	1 653,501	0,192	0,149	0,629	2,000	5 218,702	2,957	0,025	0,048	0,316
330631302	**Gare Saint-Jean 2**	**Bordeaux**	1,045	2 403,541	1 340,001	0,708	0,037	0,757	0,000	5 152,383	2,527	0,012	0,170	0,554
330631303	**Gare Saint-Jean 3**	**Bordeaux**	0,290	2 216,789	1 229,501	0,140	0,143	0,620	2,000	4 126,038	2,339	0,058	0,031	0,043
330631304	**Gare Saint-Jean 4**	**Bordeaux**	0,301	3 216,789	2 206,307	0,076	0,118	0,455	2,000	7 527,227	3,643	0,016	0,464	0,257
330631305	**Gare Saint-Jean 5**	**Bordeaux**	0,217	2 550,622	1 532,501	0,430	0,151	0,566	3,000	5 116,785	2,923	0,038	0,029	0,656
330650000	**Bouliac**	**Bouliac**	7,440	3 228,000	1 411,093	0,803	0,006	0,962	0,000	10 132,755	1,947	0,410	0,066	0,118
330690101	**Jean-Moulin**	**Le Bouscat**	0,610	2 624,321	1 445,489	0,450	0,016	0,860	1,000	6 052,162	2,045	0,137	0,046	0,119
330690102	**Centre-Ermitage**	**Le Bouscat**	0,446	2 385,106	1 180,991	0,468	0,027	0,859	3,000	4 170,455	2,059	0,112	0,365	0,208
330690103	**La Garenne-Baudin**	**Le Bouscat**	0,630	2 884,834	1 563,988	0,534	0,117	0,782	0,000	6 223,995	1,909	0,094	0,043	0,170
330690104	**Ausone-Les Ecus**	**Le Bouscat**	0,670	3 125,069	1 821,986	0,275	0,105	0,873	1,000	6 759,539	2,265	0,123	0,011	0,022
330690105	**Jean-Jaures-Ravezie**	**Le Bouscat**	0,481	2 330,510	1 240,991	0,610	0,031	0,820	2,000	4 184,564	1,718	0,084	0,106	0,177
330690106	**Marceau-Tivoli**	**Le Bouscat**	0,408	2 742,793	1 743,987	0,347	0,008	0,863	1,000	6 670,913	2,528	0,217	0,227	0,187

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
330690107	**Barriere du Medoc**	**Le Bouscat**	0,385	2 313,887	1 164,991	0,594	0,070	0,858	2,000	5 333,910	2,786	0,129	0,011	0,288
330690108	**Cheneraie-Lavigne**	**Le Bouscat**	0,540	2 619,386	1 300,490	0,483	0,149	0,814	3,000	5 109,896	2,091	0,160	0,009	0,067
330690109	**Hippodrome-Lafon-Feline**	**Le Bouscat**	1,106	2 181,094	1 064,492	0,584	0,281	0,778	2,000	3 871,457	2,544	0,106	0,109	0,037
330750101	**Tour de Gassies-Treulon**	**Bruges**	2,754	2 857,783	1 325,534	0,713	0,005	0,903	0,000	6 400,128	2,436	0,172	0,024	0,039
330750102	**Centre Ville**	**Bruges**	0,517	2 405,569	1 370,536	0,223	0,039	0,897	3,000	4 596,358	1,934	0,132	0,178	0,033
330750103	**La Marianne-Sainte Germaine**	**Bruges**	0,896	3 411,442	1 466,539	0,589	0,199	0,918	1,000	8 121,351	1,804	0,113	0,030	0,041
330750104	**Cimetiere Nord-Petit Bruges**	**Bruges**	2,305	4 463,575	2 448,065	0,377	0,124	0,934	2,000	10 631,301	2,057	0,206	0,037	0,024
330750105	**Villabois-La Hutte**	**Bruges**	6,288	3 815,631	1 592,043	0,489	0,020	0,957	2,000	7 901,003	2,075	0,337	0,094	0,013
330960101	**Nord**	**Carbon-Blanc**	2,374	3 310,408	1 291,000	0,796	0,005	0,932	0,000	14 483,399	1,842	0,092	0,044	0,037
330960102	**Sud**	**Carbon-Blanc**	0,881	1 884,165	905,000	0,782	0,057	0,910	0,000	3 633,851	1,800	0,127	0,012	0,043
330960103	**Centre**	**Carbon-Blanc**	0,670	2 054,427	1 017,000	0,507	0,064	0,825	0,000	4 044,158	2,024	0,094	0,012	0,129
331190101	**Palmer 1**	**Cenon**	0,536	2 710,366	1 243,002	0,015	0,846	0,702	0,000	3 000,736	3,954	0,343	0,007	0,021
331190102	**Palmer 2**	**Cenon**	0,156	2 381,186	885,002	0,008	0,983	0,737	4,000	1 933,547	3,182	0,091	0,552	0,000
331190103	**Cavailles-Camparian**	**Cenon**	1,313	3 146,783	1 505,003	0,522	0,314	0,745	1,000	5 513,802	1,925	0,329	0,085	0,051
331190104	**Gravieres-Gravette-Beaulieu-Lagrue-Plaisance**	**Cenon**	1,417	3 403,414	1 503,503	0,863	0,007	0,854	4,000	6 741,948	1,921	0,174	0,173	0,011
331190105	**Saraillere-Ronceval-Seigliere**	**Cenon**	0,419	2 176,984	1 028,502	0,113	0,879	0,726	5,000	2 051,975	2,935	0,064	0,014	0,000
331190106	**Grand Pavois-Cimetiere St-Paul**	**Cenon**	0,310	1 921,656	1 046,502	0,320	0,497	0,802	1,000	2 675,608	2,132	0,035	0,006	0,002
331190107	**Maregue**	**Cenon**	0,174	2 116,753	1 112,502	0,007	0,854	0,667	2,000	3 848,717	3,741	0,083	0,016	0,001

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
331190108	**Bas Cenon-Cours Victor Hugo-Gambetta**	**Cenon**	0,612	2 426,347	1 277,002	0,612	0,154	0,704	2,000	4 150,227	1,971	0,177	0,020	0,210
331190109	**Bas Cenon-Cours Verdun-Testaud**	**Cenon**	0,743	2 598,512	1 524,003	0,558	0,021	0,694	2,000	5 281,385	1,978	0,032	0,214	0,212
331620101	**Cantinolle**	**Eysines**	2,252	3 168,824	1 544,989	0,637	0,029	0,951	0,000	7 986,730	1,894	0,069	0,010	0,146
331620102	**Bourg**	**Eysines**	2,190	3 099,459	1 406,490	0,750	0,022	0,936	4,000	7 819,396	1,940	0,117	0,061	0,094
331620103	**La Lesque**	**Eysines**	4,417	3 149,398	1 624,488	0,582	0,012	0,931	0,000	8 280,541	1,966	0,285	0,017	0,031
331620104	**Vigean**	**Eysines**	0,520	2 747,124	1 109,992	0,217	0,752	0,807	1,000	10 149,996	2,171	0,111	0,082	0,020
331620105	**Derby**	**Eysines**	0,762	2 321,216	910,993	0,669	0,095	0,894	2,000	4 224,490	1,880	0,112	0,955	0,010
331620106	**Grand Louis**	**Eysines**	1,006	3 666,934	1 858,487	0,393	0,042	0,872	1,000	7 041,466	2,059	0,172	0,068	0,017
331620107	**Migron**	**Eysines**	0,806	3 609,045	1 558,489	0,600	0,009	0,929	4,000	7 264,042	2,012	0,077	0,422	0,018
331670101	**La Souys**	**Floirac**	2,310	4 028,414	2 459,535	0,316	0,112	0,771	2,000	7 419,974	2,176	0,128	0,330	0,087
331670102	**Gambetta**	**Floirac**	0,438	2 189,807	1 097,516	0,463	0,419	0,729	2,000	3 797,470	1,845	0,070	0,022	0,112
331670103	**Gravette**	**Floirac**	0,265	1 319,407	483,507	0,333	0,634	0,653	3,000	1 470,421	1,990	0,144	0,002	0,043
331670104	**Coteaux**	**Floirac**	1,470	2 473,405	1 178,017	0,549	0,034	0,946	2,000	6 238,786	1,975	0,469	0,066	0,044
331670108	**La Maregue Etendu**	**Floirac**	0,355	2 502,017	1 076,016	0,237	0,604	0,732	4,000	2 594,617	2,235	0,156	0,012	0,000
331670109	**Rebedech**	**Floirac**	0,831	1 715,642	699,011	0,965	0,018	0,913	3,000	3 556,235	1,795	0,216	0,035	0,049
331670110	**Plateaux**	**Floirac**	2,613	2 302,309	870,513	0,977	0,012	0,956	0,000	5 346,731	1,709	0,448	0,026	0,028
331920101	**Zone d'Activite Bersol**	**Gradignan**	0,915	22,111	9,500	1,000	0,000	1,000	0,000	208,851	2,448	0,211	1,596	0,000
331920102	**Saint-Gery**	**Gradignan**	0,383	1 774,785	971,983	0,020	0,431	0,918	4,000	2 345,092	3,019	0,312	0,009	0,011
331920103	**Malartic**	**Gradignan**	0,657	3 037,392	1 358,974	0,665	0,213	0,912	4,000	7 194,562	2,054	0,284	0,047	0,012
331920104	**Beausoleil**	**Gradignan**	5,465	3 270,780	1 388,475	0,938	0,003	0,967	4,000	9 183,100	1,801	0,492	4,152	0,156
331920105	**Loustalot**	**Gradignan**	0,944	2 315,400	1 163,980	0,548	0,206	0,823	3,000	3 896,082	2,037	0,209	0,033	0,052
331920106	**Moulineau**	**Gradignan**	1,187	2 477,651	1 312,476	0,508	0,010	0,890	1,000	5 598,749	1,972	0,258	0,258	0,058
331920107	**Le Brandier**	**Gradignan**	1,232	3 796,837	1 707,469	0,282	0,012	0,909	0,000	6 614,261	2,010	0,246	0,038	0,015
331920108	**Ornon**	**Gradignan**	2,574	3 045,784	1 350,475	0,756	0,148	0,959	0,000	15 037,490	2,033	0,385	3,493	0,043

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
331920110	**Naudet**	**Gradignan**	0,675	2 063,442	1 538,972	0,033	0,658	0,594	0,000	2 442,546	3,156	0,155	0,050	0,005
331920111	**Brannes**	**Gradignan**	1,662	2 634,818	1 405,974	0,582	0,223	0,881	2,000	4 821,728	2,000	0,465	0,011	0,014
332000101	**Baraillot**	**Le Haillan**	4,381	2 333,286	1 198,142	0,640	0,003	0,937	0,000	12 159,451	2,022	0,339	0,045	0,014
332000102	**Bechade**	**Le Haillan**	1,944	2 340,454	1 177,548	0,481	0,353	0,873	5,000	4 595,302	2,052	0,260	0,117	0,036
332000103	**Miotte**	**Le Haillan**	1,101	2 837,150	1 514,511	0,677	0,005	0,926	0,000	7 142,576	1,870	0,126	0,087	0,082
332000104	**Gasquet**	**Le Haillan**	1,807	2 428,111	1 019,342	0,954	0,003	0,969	0,000	6 354,254	1,730	0,332	0,167	0,010
332490101	**Cite Carriet 1**	**Lormont**	0,659	2 380,677	956,016	0,391	0,364	0,815	5,000	2 603,391	2,393	0,143	0,006	0,071
332490102	**Cite Carriet 2-La Croix Rouge**	**Lormont**	0,493	2 035,228	861,015	0,122	0,488	0,699	0,000	4 832,913	2,710	0,226	0,286	0,005
332490103	**Le Bourg-Le Vieux Bourg**	**Lormont**	1,395	2 598,462	1 170,020	0,805	0,006	0,838	1,000	5 146,735	2,457	0,343	0,053	0,437
332490104	**Genicart 3**	**Lormont**	0,151	1 883,211	838,015	0,006	0,975	0,636	1,000	1 633,333	3,829	0,070	0,005	0,000
332490105	**Genicart 2**	**Lormont**	0,438	1 111,940	585,511	0,226	0,778	0,701	3,000	1 445,891	2,654	0,096	0,022	0,000
332490106	**Residences des Hauts de Lormont**	**Lormont**	1,323	2 185,083	789,514	0,981	0,016	0,956	1,000	5 144,501	1,769	0,304	0,022	0,013
332490107	**Genicart 1**	**Lormont**	0,205	2 831,212	1 246,523	0,000	0,955	0,602	4,000	2 529,222	5,323	0,204	0,022	0,000
332490108	**Lissandre**	**Lormont**	0,984	2 180,864	1 037,018	0,425	0,354	0,746	2,000	4 076,113	2,205	0,252	0,243	0,048
332490109	**Zup**	**Lormont**	0,171	2 103,536	1 036,019	0,029	0,978	0,597	3,000	1 976,518	3,087	0,156	0,061	0,005
332490110	**Z.i. Quatre Pavillons-La Gardette**	**Lormont**	1,394	1 459,787	711,012	0,266	0,241	0,815	0,000	2 316,536	2,537	0,124	0,018	0,013
332730101	**Nord**	**Martignas-sur-Jalle**	12,277	5 254,666	1 364,317	0,988	0,001	0,983	0,000	9 796,962	1,745	0,700	0,221	0,017
332730102	**Sud**	**Martignas-sur-Jalle**	14,110	2 100,334	1 459,103	0,672	0,010	0,957	0,000	9 408,903	1,805	0,865	0,010	0,035
332810101	**Centre-Ville 1**	**Mérignac**	0,236	2 218,945	1 694,494	0,005	0,979	0,755	0,000	5 001,211	4,620	0,197	0,007	0,003
332810102	**Centre-Ville 2**	**Mérignac**	0,851	1 812,313	827,997	0,540	0,013	0,827	4,000	2 841,548	2,085	0,407	0,567	0,009
332810103	**Centre-Ville 3**	**Mérignac**	0,624	2 542,835	1 285,995	0,141	0,321	0,779	3,000	5 902,863	2,198	0,217	0,059	0,010

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
332810104	**Centre-Ville 4**	**Mérignac**	0,648	2 287,249	1 288,495	0,405	0,030	0,849	0,000	5 466,628	1,891	0,188	0,022	0,083
332810201	**Capeyron 1**	**Mérignac**	0,428	3 691,414	2 037,493	0,052	0,519	0,847	6,000	12 859,950	2,652	0,342	0,011	0,033
332810202	**Capeyron 2**	**Mérignac**	0,444	2 405,366	1 345,995	0,259	0,056	0,866	0,000	5 045,824	1,884	0,058	0,014	0,048
332810203	**Capeyron 3**	**Mérignac**	0,727	2 473,416	1 297,995	0,434	0,007	0,933	0,000	5 225,275	1,802	0,126	0,017	0,041
332810301	**Arlac 1**	**Mérignac**	1,400	2 720,023	1 361,995	0,671	0,011	0,900	0,000	5 702,779	1,863	0,281	0,017	0,039
332810302	**Arlac 2**	**Mérignac**	1,036	5 802,836	3 726,487	0,245	0,041	0,772	3,000	12 663,069	1,951	0,138	0,037	0,030
332810401	**CHEMIN-LONG et GARIES**	**Mérignac**	2,815	3 689,044	1 775,493	0,756	0,009	0,875	2,000	10 220,177	1,592	0,236	0,090	0,038
332810402	**Zone Commerciale (che. Long)**	**Mérignac**	1,380	751,027	326,548	0,831	0,000	0,961	0,000	2 270,269	2,039	0,085	0,186	0,051
332810501	**Le Jard**	**Mérignac**	0,493	2 243,989	1 271,995	0,402	0,297	0,856	0,000	3 698,778	1,944	0,073	0,029	0,017
332810502	**Bourran**	**Mérignac**	0,363	2 279,549	1 265,495	0,283	0,115	0,827	1,000	4 138,658	1,936	0,088	0,028	0,046
332810601	**Piquey**	**Mérignac**	1,815	3 415,016	1 790,302	0,437	0,005	0,899	3,000	6 322,883	1,880	0,096	0,020	0,019
332810701	**Eyquems**	**Mérignac**	1,118	3 006,987	1 442,995	0,510	0,022	0,907	2,000	6 611,646	1,740	0,209	0,013	0,033
332810801	**Les Pins**	**Mérignac**	0,790	2 610,714	1 282,995	0,401	0,348	0,829	1,000	4 139,938	1,732	0,113	0,012	0,011
332810901	**La Foret**	**Mérignac**	0,928	3 187,037	1 518,995	0,631	0,033	0,911	2,000	7 765,385	1,864	0,077	0,260	0,033
332811002	**Labatut 1**	**Mérignac**	0,930	2 645,406	1 213,996	0,475	0,026	0,879	2,000	5 782,760	2,059	0,301	0,047	0,025
332811003	**Labatut 2**	**Mérignac**	0,242	2 178,144	1 208,496	0,147	0,492	0,909	0,000	4 079,174	2,251	0,167	0,024	0,007
332811101	**La Glaciere**	**Mérignac**	0,730	4 069,153	1 965,493	0,500	0,079	0,895	2,000	7 547,883	2,335	0,129	0,014	0,146
332811201	**Bourdillot**	**Mérignac**	0,686	4 381,090	2 468,991	0,518	0,048	0,840	0,000	10 032,769	2,194	0,072	0,482	0,064
332811301	**Le Burck**	**Mérignac**	1,355	1 818,444	1 090,996	0,154	0,749	0,822	2,000	2 401,643	2,031	0,519	0,161	0,011
332811401	**Beutre**	**Mérignac**	6,493	3 477,522	1 352,995	0,854	0,002	0,961	2,000	8 412,122	1,654	0,429	0,044	0,021
332811501	**Marchegay**	**Mérignac**	8,407	436,004	83,865	0,889	0,047	0,957	0,000	2 417,882	2,053	0,539	0,273	0,108
332811502	**Zone Aeroportuaire**	**Mérignac**	8,471	356,651	63,569	0,946	0,000	1,000	0,000	225,972	2,306	0,096	0,087	0,043
332811503	**Beaudesert**	**Mérignac**	2,877	1 809,386	674,628	0,379	0,163	0,889	1,000	2 451,030	2,243	0,190	0,126	0,004
332811504	**Z.i du Phare**	**Mérignac**	1,323	76,442	248,578	0,116	0,000	0,907	0,000	232,346	2,177	0,074	1,695	0,026
333120101	**Ouest**	**Parempuyre**	2,905	2 600,000	1 044,431	0,945	0,004	0,935	0,000	7 361,427	1,825	0,503	0,012	0,025

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
333120102	**Centre**	**Parempuyre**	1,700	2 306,000	948,599	0,876	0,008	0,957	0,000	5 994,699	1,810	0,178	0,069	0,107
333120103	**Est**	**Parempuyre**	14,962	3 016,000	1 442,504	0,659	0,003	0,913	0,000	8 071,962	1,927	0,116	0,239	0,063
333180102	**3 m**	**Pessac**	2,153	2 617,572	1 092,505	0,675	0,310	0,886	1,000	4 687,445	1,722	0,536	0,245	0,019
333180103	**Madran**	**Pessac**	1,093	3 036,061	1 402,006	0,897	0,003	0,930	2,000	6 110,002	1,712	0,171	0,147	0,014
333180104	**Noes**	**Pessac**	0,869	2 526,318	1 302,006	0,631	0,252	0,875	2,000	5 110,700	1,728	0,161	0,218	0,032
333180105	**Bellegrave**	**Pessac**	0,757	2 143,787	1 165,505	0,499	0,001	0,916	1,000	3 825,063	1,905	0,148	0,029	0,048
333180106	**Le Bourg**	**Pessac**	1,072	3 568,858	1 860,008	0,488	0,050	0,856	1,000	7 273,108	2,005	0,166	0,112	0,141
333180107	**Les Echoppes**	**Pessac**	1,037	2 247,000	1 144,505	0,757	0,011	0,873	2,000	9 967,824	1,808	0,387	0,052	0,082
333180108	**Le Monteil**	**Pessac**	1,354	2 993,886	1 541,507	0,561	0,005	0,913	1,000	7 261,923	1,688	0,344	0,091	0,052
333180109	**l'Alouette**	**Pessac**	1,362	2 749,690	1 231,506	0,684	0,032	0,905	2,000	6 201,598	1,723	0,288	0,185	0,042
333180110	**France**	**Pessac**	2,498	3 161,391	1 477,507	0,870	0,040	0,949	0,000	15 531,868	1,728	0,352	2,549	0,033
333180111	**Cap de Bos**	**Pessac**	1,595	3 118,588	1 409,507	0,768	0,076	0,914	2,000	7 182,961	1,609	0,287	0,038	0,004
333180112	**Cazalet**	**Pessac**	1,145	3 572,014	1 570,007	0,656	0,008	0,875	4,000	6 698,122	1,736	0,161	0,066	0,017
333180113	**Camponac**	**Pessac**	0,620	2 568,396	1 381,006	0,218	0,546	0,757	2,000	3 762,222	1,788	0,288	0,049	0,032
333180115	**Sardine**	**Pessac**	1,537	4 049,092	2 048,509	0,650	0,079	0,838	5,000	8 658,214	1,864	0,221	0,029	0,062
333180116	**Candau**	**Pessac**	0,959	3 020,520	1 474,007	0,631	0,024	0,804	2,000	6 709,581	1,865	0,341	0,049	0,021
333180117	**Fac Sciences-Droit**	**Pessac**	0,941	3 209,363	1 771,508	0,125	0,551	0,582	0,000	3 151,061	2,446	0,154	0,270	0,004
333180118	**Fac Lettres**	**Pessac**	0,619	2 106,681	1 519,121	0,107	0,891	0,299	0,000	0,000	3,170	0,111	0,009	0,001
333180119	**Chataigneraie**	**Pessac**	0,306	2 615,712	1 120,505	0,057	0,810	0,737	3,000	2 575,519	2,923	0,288	0,004	0,005
333180120	**Parc Industriel**	**Pessac**	3,290	401,221	130,886	0,770	0,041	1,000	1,000	2 193,976	2,422	0,293	0,127	0,019
333180121	**Saige Sud**	**Pessac**	0,670	2 521,791	1 263,006	0,154	0,357	0,830	3,000	3 088,196	2,470	0,244	0,019	0,004
333180122	**Saige Nord**	**Pessac**	0,143	2 324,316	1 276,006	0,006	0,853	0,621	1,000	2 316,109	7,222	0,145	0,007	0,001
333180123	**Toctoucau**	**Pessac**	9,875	2 641,440	953,504	0,996	0,000	0,976	2,000	8 678,681	1,607	0,657	0,031	0,053
333180124	**Magonty**	**Pessac**	4,492	3 569,303	1 355,506	0,978	0,006	0,976	2,000	11 228,308	1,572	0,591	0,080	0,014
333760000	**Saint-Aubin-de-Médoc**	**Saint-Aubin-de-Médoc**	34,689	6 539,000	2 574,647	0,928	0,014	0,971	0,000	19 835,177	1,774	0,843	0,052	0,037
334340000	**Saint-Louis-de-Montferrand**	**Saint-Louis-de-Montferrand**	8,585	2 092,000	915,672	0,838	0,023	0,906	0,000	5 505,463	1,683	0,183	0,035	0,172

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
334490101	**Zone Route du Porge**	**Saint-Médard-en-Jalles**	42,587	229,660	101,904	1,000	0,000	0,917	0,000	681,336	1,857	0,877	0,035	0,167
334490102	**Caupian-Sans Souci**	**Saint-Médard-en-Jalles**	2,445	2 643,561	1 136,495	0,868	0,003	0,967	0,000	6 505,327	1,746	0,538	0,015	0,015
334490103	**Hastignan**	**Saint-Médard-en-Jalles**	0,943	1 975,468	847,996	0,874	0,021	0,961	3,000	10 066,044	1,896	0,106	0,108	0,031
334490104	**Hastignan-Picot**	**Saint-Médard-en-Jalles**	2,007	3 585,207	1 542,993	0,933	0,027	0,973	2,000	20 233,104	1,810	0,291	0,008	0,069
334490105	**Centre Ville 1**	**Saint-Médard-en-Jalles**	1,529	2 463,733	1 137,995	0,919	0,073	0,886	1,000	6 390,118	1,862	0,301	0,064	0,063
334490106	**Centre Ville 2**	**Saint-Médard-en-Jalles**	1,275	3 822,615	2 100,992	0,389	0,007	0,826	3,000	7 621,391	2,022	0,168	0,116	0,142
334490107	**Gajac**	**Saint-Médard-en-Jalles**	3,200	3 210,198	1 420,494	0,756	0,104	0,903	3,000	14 625,709	1,831	0,381	0,021	0,105
334490108	**Corbiac 1**	**Saint-Médard-en-Jalles**	2,253	2 740,195	1 164,995	0,941	0,013	0,955	1,000	6 729,346	1,715	0,327	0,026	0,029
334490109	**Corbiac 2**	**Saint-Médard-en-Jalles**	1,697	2 550,094	1 030,996	0,963	0,005	0,982	1,000	12 654,094	1,631	0,331	0,023	0,015
334490110	**Zone d'Activite (snpe)**	**Saint-Médard-en-Jalles**	3,369	101,145	42,095	1,000	0,000	0,881	0,000	0,000	2,483	0,701	0,287	0,500
334490111	**Zone d'Activite (caepe-Aerospatiale)**	**Saint-Médard-en-Jalles**	10,993	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,081	0,943	0,000	1,000
334490112	**Issac-Cerillan**	**Saint-Médard-en-Jalles**	3,617	3 551,250	1 677,493	0,746	0,001	0,965	1,000	10 037,174	1,866	0,550	0,122	0,069
334490113	**Magudas**	**Saint-Médard-en-Jalles**	8,780	2 304,876	904,496	0,867	0,026	0,955	2,000	6 272,114	1,950	0,715	0,087	0,072

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
334870000	**Saint-Vincent-de-Paul**	**Saint-Vincent-de-Paul**	10,804	1 005,000	419,361	0,923	0,010	0,936	0,000	2 665,747	1,654	0,325	0,013	0,372
335190101	**Centre Bourg**	**Le Taillan-Médoc**	2,298	3 467,427	1 410,000	0,962	0,007	0,963	0,000	9 744,507	1,808	0,189	0,021	0,057
335190102	**Nord des Jalles**	**Le Taillan-Médoc**	6,647	2 204,138	916,000	0,991	0,005	0,965	0,000	5 598,377	1,772	0,723	0,030	0,041
335190103	**Sud Est**	**Le Taillan-Médoc**	6,137	3 885,435	1 696,000	0,793	0,010	0,948	0,000	10 115,845	1,835	0,387	0,138	0,093
335220101	**Poste-Mairie**	**Talence**	0,984	5 071,543	3 300,989	0,233	0,199	0,617	4,000	9 062,034	2,311	0,143	0,119	0,058
335220102	**La Fauvette**	**Talence**	0,525	3 886,099	2 417,491	0,244	0,255	0,751	2,000	6 636,790	2,109	0,218	0,005	0,045
335220103	**Combattants-Bijou**	**Talence**	1,826	2 961,449	1 982,993	0,112	0,585	0,416	2,000	4 976,739	2,285	0,286	0,053	0,018
335220104	**Medoquine-Haut-Brion**	**Talence**	1,092	3 848,252	2 558,491	0,318	0,153	0,715	2,000	7 704,028	1,921	0,358	0,199	0,090
335220105	**Cauderes**	**Talence**	0,494	3 188,345	1 817,494	0,615	0,025	0,758	1,000	6 755,223	2,135	0,035	0,022	0,248
335220106	**E. Zola**	**Talence**	0,411	3 368,119	1 791,494	0,527	0,020	0,789	1,000	6 769,123	2,157	0,078	0,028	0,283
335220107	**Saint-Genes**	**Talence**	0,231	2 509,492	1 469,495	0,466	0,021	0,673	2,000	4 744,304	2,190	0,031	0,015	0,439
335220108	**Peylanne-Leysotte**	**Talence**	0,744	3 915,059	2 104,992	0,417	0,094	0,844	0,000	7 014,152	1,961	0,172	0,066	0,043
335220109	**Plume-La-Poule**	**Talence**	0,719	3 865,503	2 299,492	0,288	0,118	0,796	1,000	6 649,096	2,083	0,112	0,044	0,061
335220110	**Megret**	**Talence**	0,475	2 014,194	1 207,496	0,220	0,404	0,714	4,000	3 219,174	2,056	0,092	0,217	0,013
335220111	**Lycee**	**Talence**	0,425	2 274,941	1 395,495	0,335	0,230	0,742	0,000	5 102,339	1,891	0,134	0,027	0,032
335220112	**Thouars 2**	**Talence**	0,122	1 774,935	948,497	0,027	0,476	0,828	4,000	2 247,802	3,904	0,109	0,010	0,022
335220113	**Thouars 1**	**Talence**	0,288	2 839,070	1 567,994	0,042	0,763	0,728	2,000	3 013,991	2,678	0,097	0,179	0,000
335500101	**Croix de Leysotte-Chanteloiseau-St Bris**	**Villenave-d'Ornon**	2,640	3 961,936	2 102,501	0,580	0,134	0,890	2,000	8 093,187	1,705	0,183	0,020	0,051
335500102	**Petit Chambery-Brown**	**Villenave-d'Ornon**	0,745	1 909,686	919,000	1,000	0,000	0,880	3,000	3 112,470	1,528	0,076	0,021	0,000

Code	***IRIS***	***Commune***	*Aire*	*Pop.*	*Logements*	*Maisons*	*Chauf. coll.*	*Voiture*	*Ecoles*	*Conso*	*Étages*	*Nature*	*Emplois*	*av. 1915*
335500103	**Chambery**	**Villenave-d'Ornon**	0,822	2 541,413	1 158,001	0,704	0,002	0,876	1,000	5 286,472	1,667	0,154	0,026	0,032
335500104	**Peyrehaut-Carbonnieux-Trigan**	**Villenave-d'Ornon**	2,524	2 177,260	997,500	0,861	0,009	0,917	1,000	5 846,808	1,713	0,603	0,024	0,056
335500105	**Saint-Martin-Canteloup-Bourleaux**	**Villenave-d'Ornon**	0,540	2 682,666	1 170,501	0,449	0,526	0,843	2,000	3 564,363	1,952	0,099	0,257	0,106
335500106	**Clemenceau-Pontac-Sallegourde-Pont Langon**	**Villenave-d'Ornon**	3,383	5 592,845	2 454,501	0,778	0,043	0,913	2,000	13 386,785	1,819	0,233	0,054	0,062
335500107	**Hourcade-Geneste-Le Bourg-Courrejean**	**Villenave-d'Ornon**	5,917	3 398,886	1 516,001	0,735	0,009	0,939	1,000	8 180,591	1,876	0,394	0,010	0,094
335500108	**La Monnaie-La Taille**	**Villenave-d'Ornon**	0,829	2 141,627	1 019,500	0,586	0,110	0,960	1,000	5 649,700	1,526	0,218	2,387	0,004
335500109	**La He-Barret-Soors**	**Villenave-d'Ornon**	1,572	3 175,840	1 383,501	0,806	0,062	0,969	4,000	7 634,322	1,841	0,305	0,105	0,048
335500110	**Bauge-Sarcignan-Versein**	**Villenave-d'Ornon**	1,083	3 080,842	1 430,501	0,273	0,021	0,900	2,000	5 980,580	1,961	0,334	0,004	0,041

Annexe D

Résultats de l'Analyse en Composantes Principales

Cette annexe se penche sur les résultats de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Celle-ci est appliquée séparément sur les données récupérées sur la métropole de Bordeaux pour les formes urbaines d'une part, et les bâtiments d'autre part. La description de ces données est faite à la section III du chapitre 2, p. 124.

Nous avons séparé l'analyse de ces résultats selon les deux catégories *formes urbaines* et *bâtiments*, c'est-à-dire que nous appliquons l'ACP aux IRIS caractérisés d'une part par les paramètres de *formes urbaines* (24 paramètres) et d'autre part par les paramètres de *bâtiments* (35 paramètres).

I. Formes urbaines

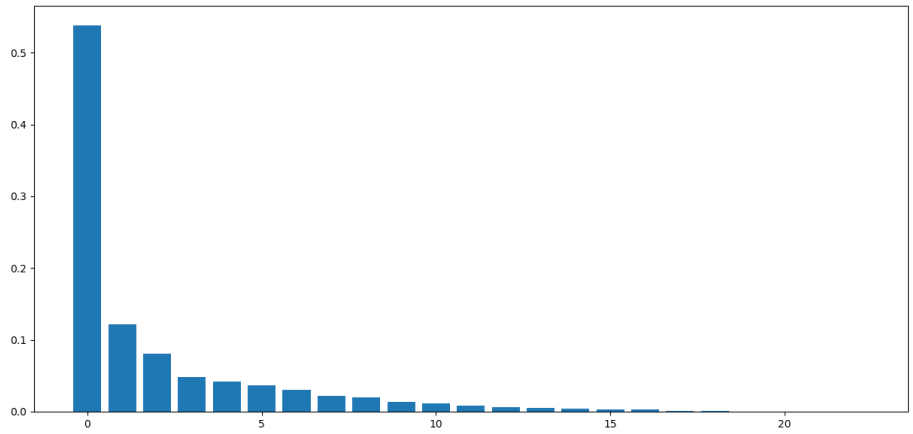


FIGURE D.1 – Variance expliquée par les différents axes de l'ACP pour l'utilisation des sols (en ratio de variance)

La figure D.1 donne le ratio de variance expliquée par les axes du plus significatif au moins significatif pour l'application de l'ACP aux IRIS avec les paramètres de formes urbaines. On peut observer que le premier axe explique à lui seul plus de 50 % de la variance des données et permet déjà une première séparation des valeurs. Les deux axes suivants sont similaires dans leur pouvoir explicatif

d'environ 10 %. La combinaison de ces trois axes permet de représenter 70 % de la variance des données. Il existe plusieurs techniques permettant de choisir combien d'axes doivent être pris en compte dans la reprojection des données : choisir arbitrairement le nombre d'axes sélectionnés selon l'usage fait des sorties de l'ACP (« *si je souhaite afficher sur un plan, je ne prendrai que les deux premiers axes* »), chercher à dépasser un seuil de variance expliquée en cumulant autant d'axes que nécessaire (le seuil varie également, on trouve plusieurs valeurs selon les cas et le choix est souvent laissé à l'appréciation de l'analyste [1] [Brems (2019)]), ou encore afficher les variances expliquées comme nous l'avons fait dans la figure D.1 et de chercher le *coude* (*elbow* ou *bend*) de l'éboulis. Cette dernière méthode peut aussi se décliner sur la courbe des variances cumulées ou des différences successives qui donnent parfois un meilleur aperçu [Brems (2019)]. De manière générale, on notera que ces techniques sont très subjectives et dépendent de la situation considérée.

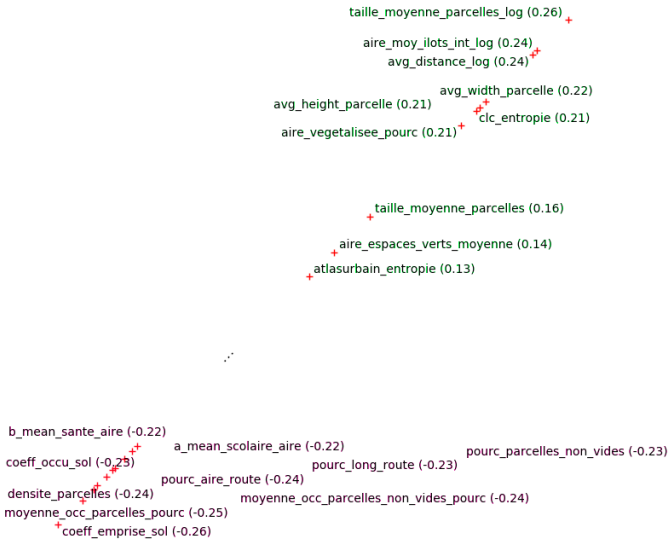


Figure D.2 – Contributions principales des paramètres au premier vecteur propre (par valeur propre décroissante)

La composition des trois premiers axes (avant le *coude* de la figure D.1) est donc intéressante : il est possible de regarder les contributions de chaque paramètre à la création de nouveaux axes en étudiant les coefficients de la combinaison linéaire. Ainsi, la figure D.2 montre les principales variables utilisées pour la construction de cet axe. Les valeurs en vert ont des contributions positives importantes (c'est-à-dire supérieure à 0.1), tandis que les valeurs en rouge ont des contributions négatives importantes (c'est-à-dire inférieures à -0.1). Ce graphique se comprend en ce que le premier axe traite ensemble les IRIS ayant des valeurs élevées dans les paramètres verts et des valeurs faibles dans les paramètres rouges, ou encore les IRIS ayant des valeurs élevées dans les paramètres rouges et des valeurs faibles dans les paramètres verts.

Ainsi, on retrouve par exemple d'un côté les quartiers ayant de grandes parcelles

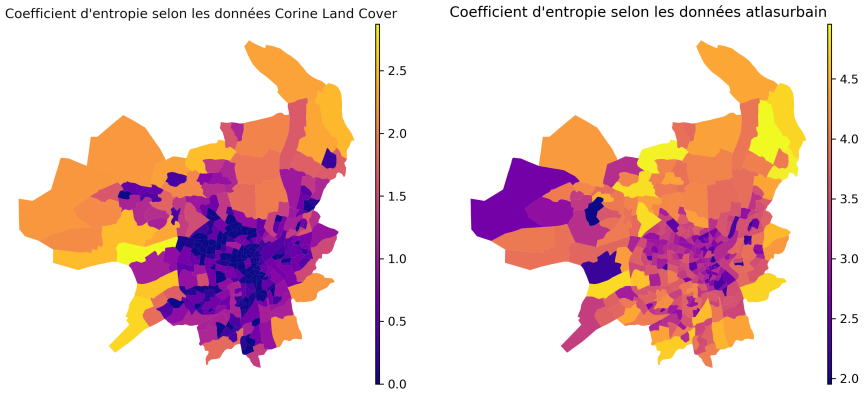
1. Il est d'ailleurs parfois proposé de le sélectionner par *cross-validation*, c'est-à-dire en séparant les données en deux ensembles, un d'entrainement, utilisé pour ajuster les paramètres du modèle, et l'autre de test sur lequel le modèle ajusté est appliqué. La valeur de seuil donnant les meilleurs résultats de prédiction sur l'ensemble de test est ainsi sélectionné. Au vu du faible nombre d'éléments (277) dont nous disposons, cette technique ne nous a pas paru pertinente.

(taille moyenne parcelles log, avg width parcelle, avg height parcelle, aire moy ilots int log, taille moyenne parcelles), beaucoup d'espaces naturels (aire espaces naturels moyenne et aire vegetalisee pourc) et peu d'accès aux transports en commun (avg distance log), avec une variabilité de types de terrains importante (clc entropie et atlasurbain entropie), et en même temps qui ont peu d'équipements (b mean sante aire, a mean scolaire aire), peu de parcelles, souvent vides, avec peu de bâti (cœff occu sol, cœff emprise sol, moyenne occ parcelles pourc, pourc parcelles non vides, densite parcelles), et peu de routes (pourc aire route et pourc long route). Dans l'autre extrême, on aurait alors les quartiers ayant un grand nombre de parcelles plutôt petites et grandement bâties (taille moyenne parcelles log, avg width parcelle, avg height parcelle, aire moy ilots int log, taille moyenne parcelles, cœff occu sol, cœff emprise sol, moyenne occ parcelles pourc, pourc parcelles non vides, densite parcelles), peu d'espaces naturels (aire espaces naturels moyenne et aire vegetalisee pourc), un bon accès aux transports en commun (avg distance log), beaucoup d'équipements (b mean sante aire, a mean scolaire aire) et de routes (pourc aire route et pourc long route). Ce premier axe sépare donc nettement les zones très denses de centre-ville des milieux ruraux en permettant une certain continuum entre ces deux extrêmes (en terme d'artificialisation et de densité). Le fait que cet axe soit le plus significatif et contienne 50 % de la variance totale des données souligne bien la réalité du paysage urbain et la différence fondamentale entre les deux milieux qui est bien retrouvée ici. Il est réconfortant que ce soit le premier trait qui apparaisse et en même temps évident quand on regarde les données d'entrée fournies et cela confirme les résultats préliminaires mis en avant par l'étude des corrélations (voir section IV.1 du chapitre 2, p. 146).

FIGURE D.3 – Contributions principales des paramètres au deuxième vecteur propre (par valeur propre décroissante)

Pour continuer l'analyse, on regarde donc les axes suivants qui séparent les IRIS selon d'autres logiques. Le deuxième axe a beaucoup de contributions positives :

tout d'abord la taille des parcelles, la disponibilité en équipements (b mean sante aire, a mean scolaire aire) et la présence importante de bâtiments (cœff occu sol, cœff emprise sol), et dans un deuxième temps un mauvais desservissement du réseau de transports en commun (avg distance log), beaucoup de parcelles (densite parcelles) et une variété importante de types d'occupation des sols (clc entropie). De l'autre côté, on trouve principalement une forte variabilité selon l'entropie d'Atlas Urbain (atlasurbain entropie, par opposition à Corine Land Cover), beaucoup d'écoles (ecoles secondaires par menage), et beaucoup de parcelles considérées comme non vides (pourc parcelles non vides). On peut y voir l'opposition entre des formes correspondant plutôt à des villes éloignées de Bordeaux, non desservies par les transports en commun mais relativement denses, et d'autres quartiers plus proches de la banlieue bordelaise, aux larges parcelles, largement construits, plus accessibles.



(A) Corine Land Cover (B) Atlas Urbain

FIGURE D.4 – Cartes des entropies d'occupation des sols selon les données de Copernicus

Le troisième axe sépare des IRIS avec beaucoup de routes (pourc aire route et pourc long route), proportionnellement beaucoup d'écoles (ecoles secondaires par menage) et des parcelles plutôt grandes, plutôt carrées (avg shape parcelle), globalement avec des îlots de petite taille (aire moy ilots int log), avec des terrains plutôt uniformes et homogènes (atlasurbain entropie, clc entropie), etc. Il s'agit donc plutôt de formes urbaines assez uniformes, accessibles en transport en commun (avg distance log).

II. Bâtiments

Le nombre de paramètres pour les bâtiments est plus important que pour les sols. En étudiant le graphique des valeurs propres de la matrice de covariance classées en ordre décroissant (*cf.* figure D.6), on assiste à deux potentiels décrochages (ou coudes), entre le troisième et le quatrième axe ou après le quatrième axe. La répartition est un peu moins contrastée que dans le premier cas puisque le premier axe ne porte que 25 % de la variance. Il faut en outre combiner neuf axes *a minima* pour parvenir à obtenir une explication de 80 % de la variance (là où cinq axes suffisaient dans le cas des formes urbaines). Cela signifie donc qu'il existe peut-être un trop grand nombre de variations parmi les bâtiments pour qu'un seul axe suffise déjà à les séparer en deux ou trois grands groupes. L'analyse

FIGURE D.5 – Contributions principales des paramètres au troisième vecteur propre (par valeur propre décroissante)

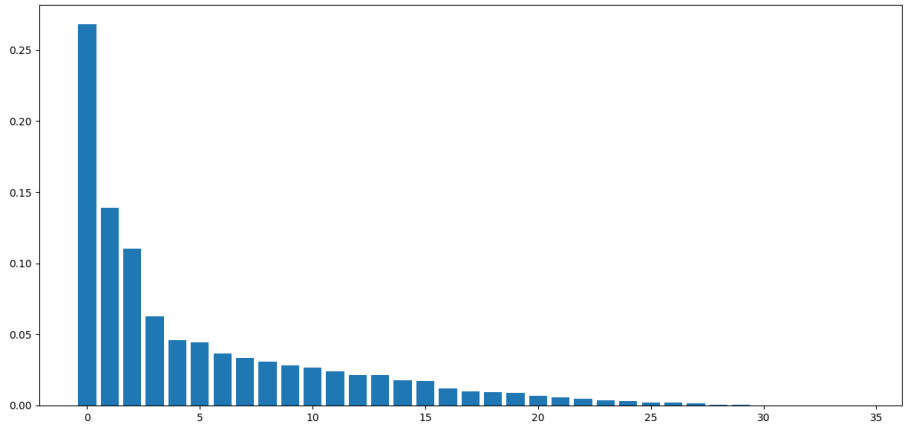


FIGURE D.6 – Variance expliquée par les différents axes de l'ACP pour les bâtiments (en ratio de variance)

des axes principaux (les trois premiers, qui portent environ 50 % de la variance) devrait nous éclairer sur la question.

On remarque déjà sur l'image D.7 que le premier axe comprend un grand nombre de paramètres impliqués avec de forts coefficients. D'un côté, on a la hauteur (avg hauteur et nb etages), avec beaucoup de logements, de population et d'entreprises (nb logements densite emprise, population densite emprise, prop aire bati entreprises service/industrie) utilisant plutôt du logement collectif. Du côté des poids négatifs, on trouve la disponibilité des voitures et des garages par ménage (rp voit1p/2p sur menages, rp garl sur menages), la disposition de chauffage individuel (rp ccind sur resprin) et le nombre de bâtiments (n batiments). On re-

FIGURE D.7 – Contributions principales des paramètres au premier vecteur propre pour les bâtiments (par valeur propre décroissante)

trouverait donc plutôt des zones denses avec des bâtiments de taille importante principalement (ce qui correspondrait à la fois aux grandes tours ou aux grands ensembles – notamment en recoupant cela avec le nombre de bâtiments et le chauffage collectif, et aux bâtiments historiques du centre-ville – en particulier en prenant en compte l'âge et la présence d'entreprises) d'un côté de l'axe, et, de l'autre côté, des bâtiments très petits (donc des maisons individuelles, mitoyennes ou non), sans entreprises installées, avec de bons équipements en voitures et assez récentes (années 80). On a donc une première séparation entre les grands bâtiments et les petits bâtiments. Néanmoins, il n'est pas surprenant que cet axe n'explique « que » 25 % de la variance totale puisque cette distinction ne rend pas compte du continuum entre ces deux extrêmes.

Le deuxième axe (présenté sur la figure D.8) oppose chauffage collectif (rp cccoll sur resprin) et individuel électrique (rp cindelec sur resprin et rp cind sur resprin dans une moindre mesure) de façon importante (facteurs de 0.33 et -0.32). Ensuite, au chauffage collectif sont associés des bâtiments avec une forte emprise (avg width/height et volume), datant plutôt des années 70 (prop perio constr 1968 1974 et prop perio constr 1975 1981) qu'ancien (prop perio constr 1915 1948 et prop perio constr 1915 1948) et disposant d'une voiture (rp voit1/voit1P sur menages). Les contributions négatives de l'axe sont en outre portées par la présence d'entreprises (prop aire bati entreprises service/industrie, sum nb employes et densite nb employes aire bati). Cet axe raffinerait donc les bâtiments qui ne sont pas très hauts en séparant les successeurs des grands ensembles (pas forcément très hauts) de bâtiments plus mixtes comme on en trouve en centre-ville.

Le troisième axe, dont l'importance est proche de celle du deuxième axe, se penche plutôt sur l'utilisation des bâtiments (*cf.* figure D.9) puisqu'il oppose très clairement la présence d'employés (sum nb employes, densite nb employes aire bati

FIGURE D.8 – Contributions principales des paramètres au deuxième vecteur propre pour les bâtiments (par valeur propre décroissante)

FIGURE D.9 – Contributions principales des paramètres au troisième vecteur propre pour les bâtiments (par valeur propre décroissante)

entreprises, prop nb employes par m2 service/industrie) à celle de la population (population densite emprise, nb logements densite emprise, population). Les lo-

caux d'entreprises sont associés à des bâtiments plutôt récents (prop perio constr 2006 2012 et prop perio constr 2001 2005) par opposition aux logements associés à des bâtiments plutôt anciens (prop perio constr 1915 1948 et prop perio constr 1949 1967). Enfin, les bâtiments d'entreprise sont liés à de forts volumes (avg width/height, volume).

Annexe E

Description exhaustive des archétypes de formes urbaines

Les pages suivantes présentent les archétypes créés pour les formes urbaines.

I. Ville dense proche 1

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	34	-	12,274
Aire (km²)	9,594	0,282	1,663
Population	94 016	2 765	12,542
Densité (hab/km²)	9 799,80	9 804,96	-

TABLEAU E.1 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Ville dense proche 1*

Ce premier archétype de forme urbaine se concentre dans le cœur de la métropole, sur le territoire de la ville de Bordeaux.

Les IRIS constituant ce cluster ont pour caractéristiques remarquables une forte homogénéité de l'occupation des sols avec une entropie de 0,1738 (0,2556), une grande proximité des arrêts de transport en commun avec un log de la distance moyenne de 5,0419 (0,2644), la valeur la plus faible parmi les clusters. Les parcelles y sont fines (19,0071 m (2,5483) de longueur moyenne et 17,8265 m (3,7391) de largeur moyenne), plutôt carrés (facteur de forme de 0,9394 (0,1506)). Ces zones sont largement irriguées par un réseau routier (0,1128 % (0,0170) de la surface) et présentent peu de terrains végétalisés, avec 7,6023 % (5,2150), deuxième valeur la plus faible avec le centre historique.

Il s'agit de la ville dense autour du centre historique, moins dense que celui-ci (39,2331 % (8,0762) contre 56,3110 % (5,2987).

Répartition de la **forme urbaine** *Ville dense proche* 1 en 2014

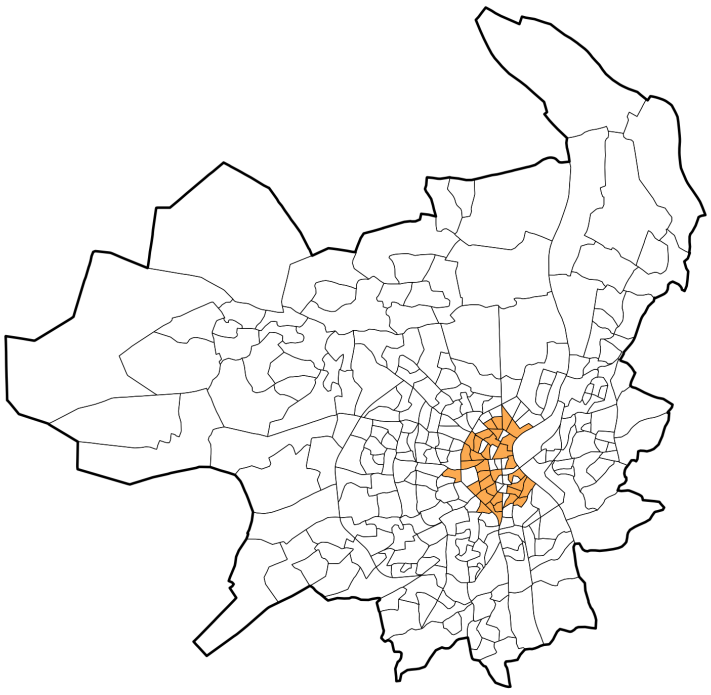


FIGURE E.1 – Carte de répartition de l'archétype *Ville dense proche 1*.

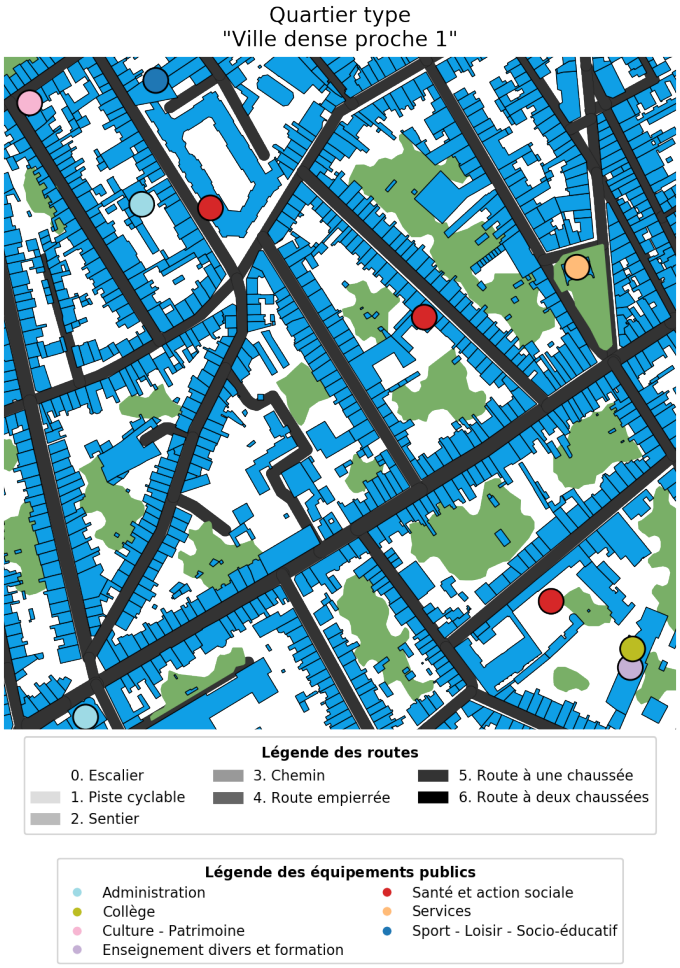


FIGURE E.2 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Ville dense proche 1*.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	37,6961	38,8100	8,4628
Écoles (%)	0,6120	0,4647	0,7068
Végétation (%)	7,6023	7,1929	5,2150
Parkings (%)	2,0260	0,5002	3,4837
Autoroutes (%)	0,0000	0,0000	0,0000
Nationales (%)	1,3615	0,0000	2,0005
Départementales (%)	1,9344	1,7085	1,4458
Autres routes (%)	8,8983	8,6892	1,7462
Non assigné [1] (%)	39,8627	37,7666	9,6266

TABLEAU E.2 – Paramètres de l'archétype *Ville dense proche 1*

II. Banlieue / petites villes 1

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	63	-	22,744
Aire (km²)	83,313	1,322	14,443
Population	180 596	2 867	24,092
Densité (hab/km²)	2 167,67	2 168,68	-

TABLEAU E.3 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Banlieue / petites villes 1*

Quand on regarde les caractéristiques de cet archétype, on peut constater qu'elle se trouve souvent très proche (à plus ou moins 26 % de la moyenne et 17,5 % de la médiane) des moyennes métropolitaines, ce qui en fait d'ailleurs la forme la plus « moyenne » des archétypes créés.

Parmi ses faits saillants, on peut remarquer une proportion de 21.096 % (9.864 [2]) en moyenne d'espaces naturels, c'est-à-dire une valeur faible dans l'absolu mais légèrement plus importante de quelques points que la moyenne métropolitaine – 19.188 % (16.171). Inversement, la surface est moins intensément bâtie que le reste du territoire, avec 13.672 % (3.198) contre 19.8 % (13.834). Il y a globalement assez peu de routes, des parcelles de taille faible, de l'ordre de 1 200 m², ce qui correspond bien à une banlieue ou à des petites villes comprenant des maisons avec jardins. L'entropie est également assez basse, témoignant d'une uniformité des modes d'occupation des sols.

Répartition de la **forme urbaine** *Banlieue / petites villes* 1 en 2014

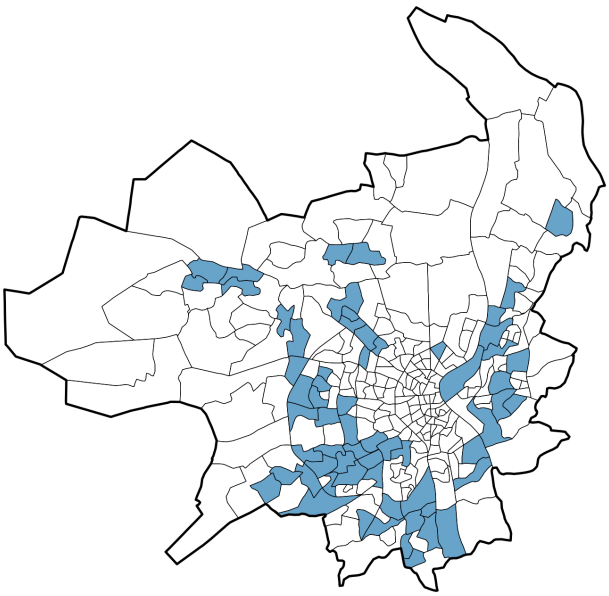


FIGURE E.3 – Carte de répartition de l'archétype *Banlieue / petites villes 1*.

2. La valeur entre parenthèse indique ici et dans la suite du chapitre l'écart-type du paramètre au sein du groupe d'IRIS.

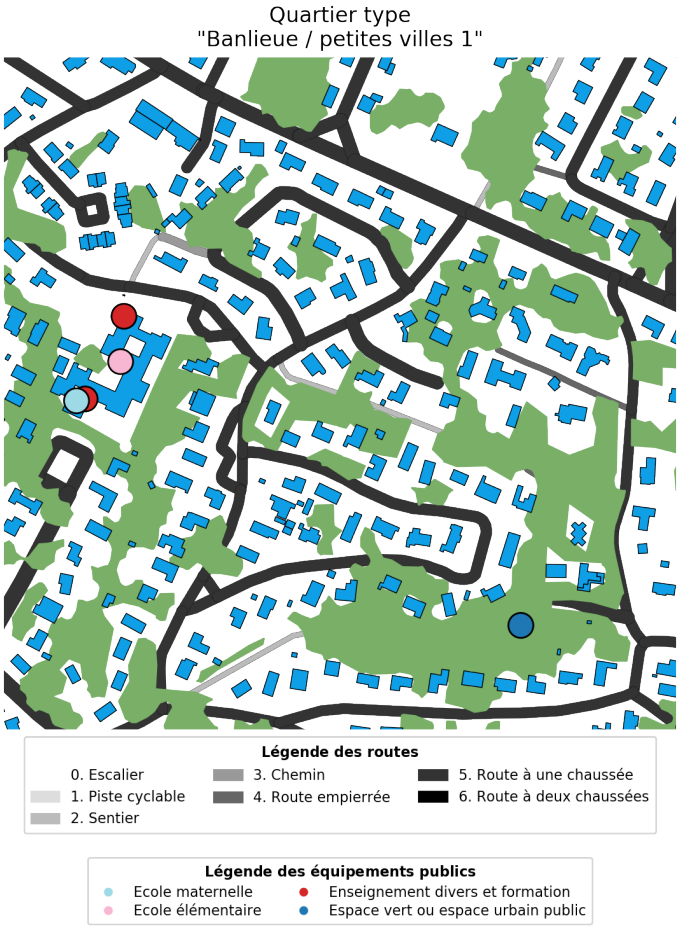


FIGURE E.4 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Banlieue / petites villes 1*.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	12,3431	12,4527	3,4919
Écoles (%)	0,1905	0,1449	0,2253
Végétation (%)	21,0956	20,8688	9,8638
Parkings (%)	0,9743	0,4627	1,1379
Autoroutes (%)	0,6559	0,0000	1,1203
Nationales (%)	0,2004	0,0000	0,4035
Départementales (%)	0,8127	0,7888	0,6126
Autres routes (%)	6,4320	6,3374	1,2522
Non assigné (%)	56,3686	56,2515	8,4134

TABLEAU E.4 – Paramètres de l'archétype *Banlieue / petites villes 1*

III. Zone rurale 1

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	15	-	5,415
Aire (km²)	198,610	13,241	34,430
Population	45 086	3 006	6,015
Densité (hab/km²)	227,01	227,02	-

TABLEAU E.5 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Zone rurale 1*

Le cluster à l'origine de l'archétype *Zone rurale* est situé exclusivement sur le pourtour de la métropole, avec des IRIS qui ont tous sauf deux une frontière commune avec la métropole. On peut noter que l'aire moyenne des IRIS est d'ailleurs très élevée avec 13,241 km² là où la moyenne des clusters de moyenne plus faible est de 1,982 km².

On peut observer que c'est une forme très peu bâtie, avec peu de routes et surtout occupée par de la végétation. Parmi les autres caractéristiques de l'archétype, elle présente une variété d'utilisation des sols plus grande que les autres avec une entropie de 2.3135 (0.2954) et une présence très faible d'établissements scolaires du secondaire. C'est là une forme plus rurale d'occupation des sols.

Répartition de la **forme urbaine** *Zone rurale* 1 en 2014

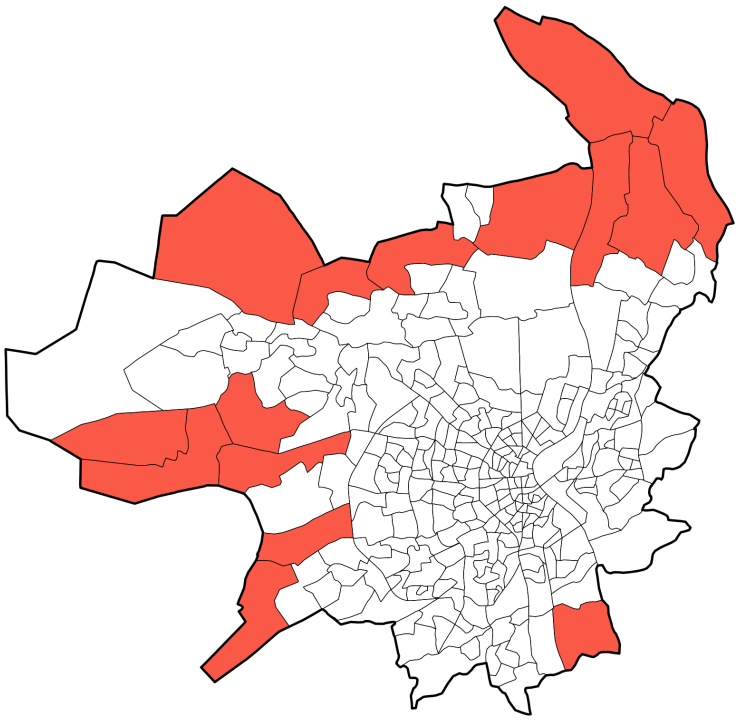


FIGURE E.5 – Carte de répartition de l'archétype *Zone rurale 1*.

FIGURE E.6 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Zone rurale 1*.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	1,5685	1,4647	1,6496
Écoles (%)	0,0192	0,0131	0,0176
Végétation (%)	51,4417	53,9015	23,5981
Parkings (%)	0,6096	0,0352	1,8221
Autoroutes (%)	0,0941	0,0000	0,2157
Nationales (%)	0,1086	0,0000	0,2233
Départementales (%)	0,2149	0,1361	0,2324
Autres routes (%)	2,4166	2,2685	0,5574
Non assigné (%)	42,9260	37,1897	23,8981

TABLEAU E.6 – Paramètres de l'archétype *Zone rurale 1*

IV. Saint-Médard-en-Jalles

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	2	-	0,722
Aire (km²)	53,722	26,861	9,313
Population	230	115	0,031
Densité (hab/km²)	4,28	4,28	-

TABLEAU E.7 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Saint-Médard-en-Jalles*

Cet archétype est un peu particulier : il ne regroupe que deux IRIS sur l'ensemble de la métropole, situés sur le territoire de la commune de Saint-Médard-en-Jalles. Ces deux IRIS sont très larges (26,861 km² en moyenne) et peu habités (230 habitants au total). Cette forme correspond en fait à une forme laissée à la nature, très peu urbanisée. Nous l'avons conservée dans notre approche alors qu'elle pourrait être considérée comme élément aberrant (ou *outlier*) puisqu'elle permet à TIMES-URBAN de ne pas forcément urbaniser tous les territoires.

Répartition de la **forme urbaine** *Saint – Médard – en – Jalles* en 2014

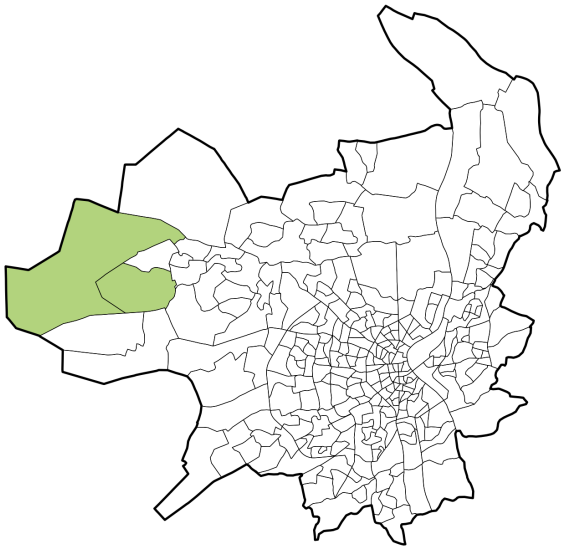


FIGURE E.7 – Carte de répartition de l'archétype *Saint-Médard-en-Jalles*.

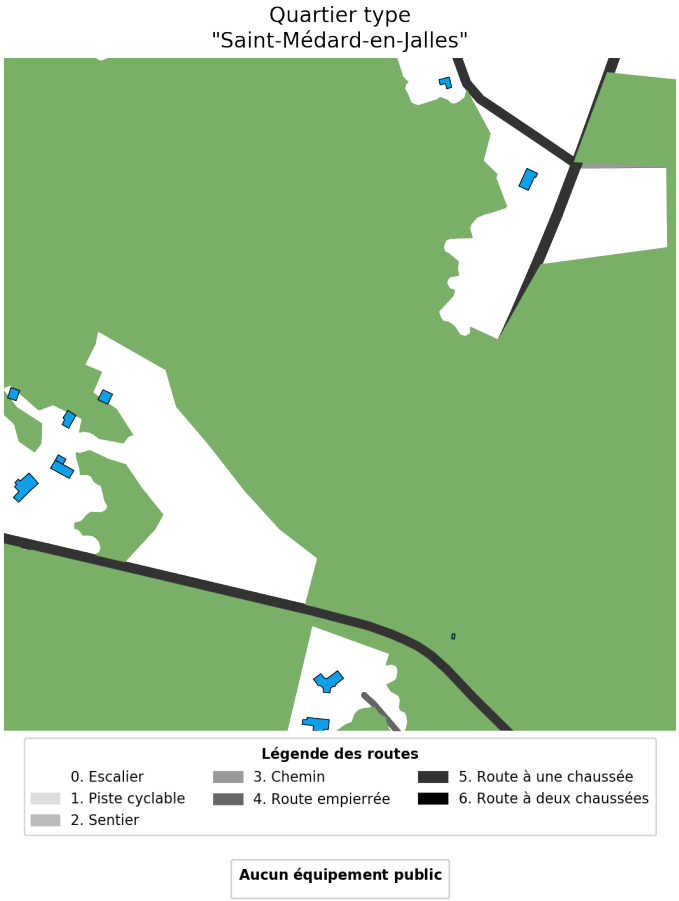


FIGURE E.8 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Saint-Médard-en-Jalles*.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	0,0906	0,0906	0,0000
Écoles (%)	0,0000	0,0000	0,0000
Végétation (%)	90,9872	90,9872	4,6912
Parkings (%)	0,1007	0,1007	0,1383
Autoroutes (%)	0,0000	0,0000	0,0000
Nationales (%)	0,0236	0,0236	0,0334
Départementales (%)	0,0591	0,0591	0,0836
Autres routes (%)	1,8447	1,8447	0,4587
Non assigné (%)	10,5535	10,5535	0,0000

TABLEAU E.8 – Paramètres de l'archétype *Saint-Médard-en-Jalles*

V. Centre historique

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	13	-	4,693
Aire (km²)	1,877	0,144	0,325
Population	35 733	2 749	4,767
Densité (hab/km²)	19 034,92	19 090,28	-

TABLEAU E.9 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Centre historique*

Cet archétype concerne beaucoup moins d'IRIS puisqu'il représente une partie du centre historique de la métropole. Les quartiers inclus sont de taille réduite puisqu'ils représentent chacun 14 hectares en moyenne [3], ce qui correspond aux surfaces les plus étroites des quartiers bordelais [4].

Cet archétype est caractérisé par des îlots de petite taille (la plus faible parmi les archétypes) [5], très peu d'aire végétalisée (3 %) [6] et beaucoup de terrain construit (plus de 56 %) [7]. Les parcelles sont nombreuses et de taille réduite. De plus, ces formes urbaines présentent une bonne porosité et un accès facile aux transports en commun, la surface occupée par des routes étant importante (la plus grande de tous les archétypes), avec 14.5 % de la surface occupée (contre 7.6 % en moyenne pour la métropole). Le sol est globalement utilisé de façon très uniforme avec un même type d'utilisation.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	54,6799	53,2710	6,0242
Écoles (%)	0,9182	0,3685	1,6325
Végétation (%)	3,2213	2,4168	2,8262
Parkings (%)	1,4034	0,8477	1,7327
Autoroutes (%)	0,0000	0,0000	0,0000
Nationales (%)	0,2106	0,0000	0,7595
Départementales (%)	2,7251	3,3972	2,2198
Autres routes (%)	11,5790	11,9257	2,3999
Non assigné (%)	24,8064	24,6755	3,7262

TABLEAU E.10 – Paramètres de l'archétype *Centre historique*

3. 14,154 ha (2,589).
4. Les IRIS de Capucins-Victoire 1, 2 et 7, du centre historique de Bordeaux sont les minima de superficie sur la métropole et font environ 11 hectares chacun. Cette moyenne de 14 hectares est donc très faible, seuls 12 IRIS de la métropole peuvent prétendre être plus petits que ces 14 hectares.
5. 0.413 ha (0.130) en moyenne.
6. 3.221 % (2.826) en moyenne.
7. 56.311 % (5.299) en moyenne.

Répartition de la **forme urbaine** *Centre historique* en 2014

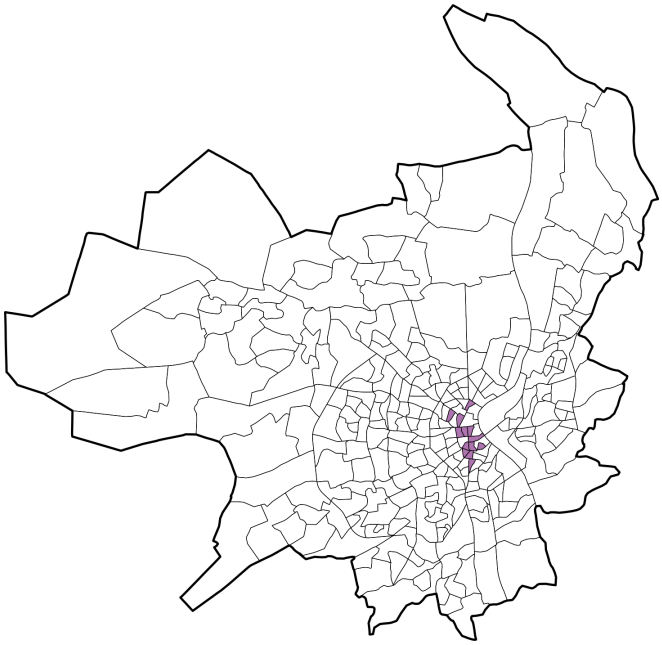


FIGURE E.9 – Carte de répartition de l'archétype *Centre historique*.

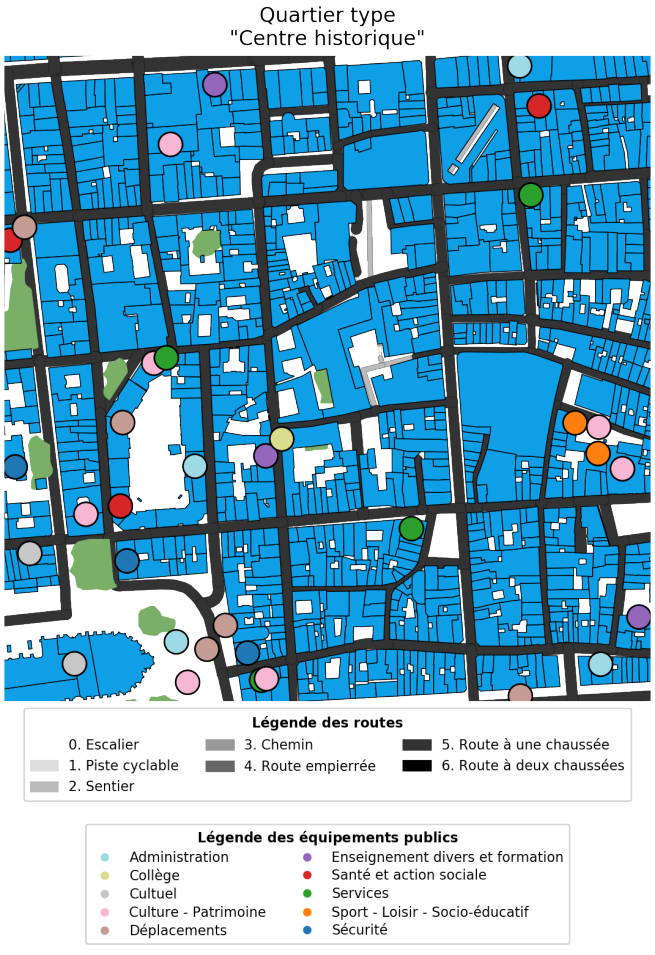


FIGURE E.10 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Centre historique*.

VI. Ville dense proche 2

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	45	-	16,245
Aire (km²)	28,839	0,641	4,999
Population	127 175	2 826	16,966
Densité (hab/km²)	4 409,87	4 408,74	-

TABLEAU E.11 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Ville dense proche 2*

Ce deuxième archétype de *Ville dense proche* est plus largement réparti dans la métropole, particulièrement à l'ouest de Bordeaux, sur les communes d'Eysines, du Bouscat et de Mérignac ainsi qu'au sud, à Talence et Villenave d'Ornon. Ces quartiers sont en outre dans certains centres-villes et correspondent à des IRIS de taille relativement faible (0,641 km² contre une moyenne métropolitaine à 2,0825 km²) et à des zones plutôt denses (population de 2 826 habitants par IRIS, à comparer avec la moyenne de 2 706 sur tout le territoire).

Les IRIS de ce cluster présentent des valeurs moyennes dans la plupart des paramètres considérés : 10,9744 % (4,9395) d'aire végétalisée contre 19.1879 % (16.1706), 19,5023 % (3,8611) d'aire bâtissable contre 19.7905 % (13.8339), 8,6261 % (1,6355) d'aire occupée par des routes contre 8.5064 % (3.1536), 9.2543 $\log\ m^2$ (0,2705) d'aire moyenne des îlots contre 9,3913 (0,7335) pour la métropole, etc.

Répartition de la **forme urbaine** *Ville dense proche* 2 en 2014

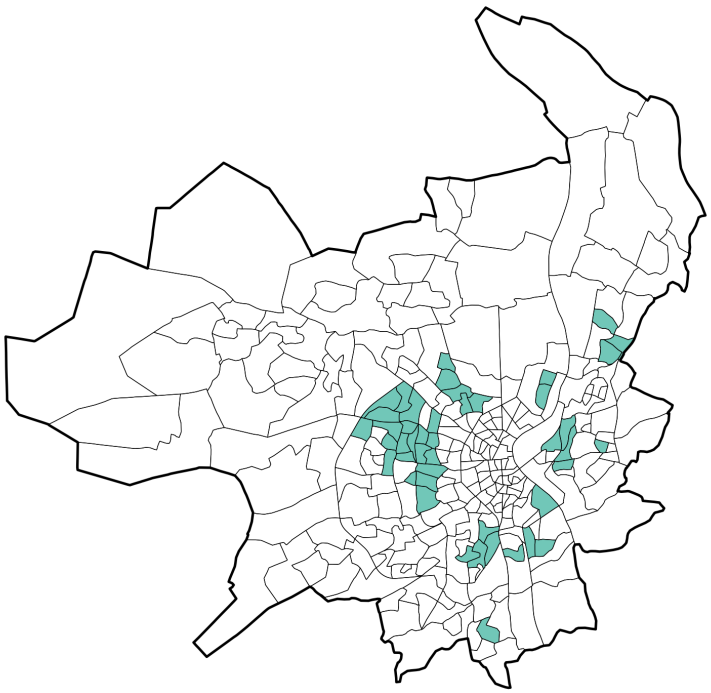


FIGURE E.11 – Carte de répartition de l'archétype *Ville dense proche 2*.

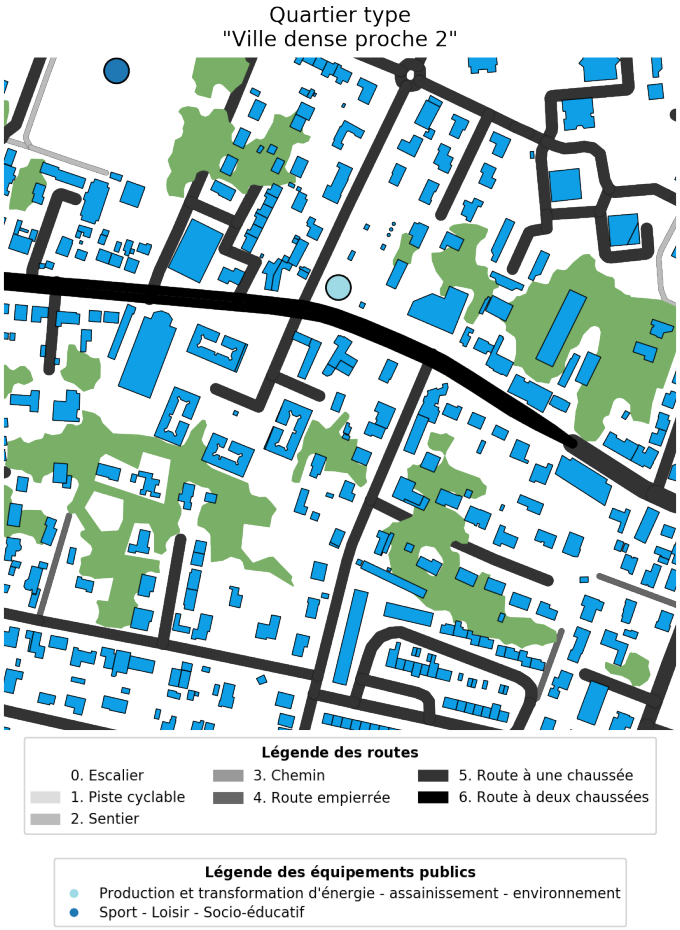


FIGURE E.12 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Ville dense proche 2*.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	18,5687	17,7721	3,9217
Écoles (%)	0,1910	0,0831	0,2951
Végétation (%)	10,9744	11,1548	4,9395
Parkings (%)	0,7186	0,3137	1,1345
Autoroutes (%)	0,2582	0,0000	0,8448
Nationales (%)	0,3458	0,0000	0,9765
Départementales (%)	0,6412	0,5066	0,6307
Autres routes (%)	7,4663	7,5026	1,1196
Non assigné (%)	60,1786	61,1655	5,2282

TABLEAU E.12 – Paramètres de l'archétype *Ville dense proche 2*

VII. Banlieue / petites villes 2

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	43	-	15,523
Aire (km²)	136,113	3,165	23,596
Population	119 273	2 774	15,912
Densité (hab/km²)	876,27	876,46	-

TABLEAU E.13 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Banlieue / petites villes 2*

Ce deuxième archétype de *Banlieue / petites villes*, tout comme le premier, est largement réparti sur le territoire de la métropole et représente près d'un quart de la superificie totale du territoire (voir tableau E.13). On remarque cependant que les IRIS concernés (voir carte E.13) sont plutôt situés loin du centre de la métropole, formant un anneau périphérique éloigné du centre d'environ une dizaine de kilomètres. De la même façon que *Banlieue / petites villes 1*, cette forme urbaine est proche de la moyenne métropolitaine, particulièrement sur la taille des îlots (< 0,5 %), le ratio de routes (< 1,5 %), et la distance moyenne aux transports en commun (≈2,0 %).

Cet archétype dispose toutefois d'une proportion plus importante de surface verte, avec 32,6573 % (14,0232) contre 21,0956 (9,8638), et une couverture plus faible de bâti que sa semblable, avec 8,3544 % (3,1003) contre 13,6717 (3,1977). Leurs ratios de routes sont similaires, à quelques pourcents près. Ces banlieues ont un accès plus difficile aux transports en commun ainsi qu'une variabilité de modes d'occupation des sols plus forte que l'archétype *Banlieue / petites villes 1*. Quand on observe la vue rapprochée (voir figure E.14) et qu'on la compare avec la figure E.4, p. 405, on constate que ces deux formes sont bien similaires dans leur déploiement et correspondent à la légende donnée.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	7,6979	7,6489	3,3117
Écoles (%)	0,0523	0,0332	0,0739
Végétation (%)	32,6573	32,6505	14,0232
Parkings (%)	0,7496	0,2521	1,0328
Autoroutes (%)	0,3848	0,0000	0,6805
Nationales (%)	0,1670	0,0000	0,2798
Départementales (%)	0,3395	0,2613	0,4097
Autres routes (%)	4,6591	4,5735	0,8695
Non assigné (%)	52,8731	54,0712	12,0043

TABLEAU E.14 – Paramètres de l'archétype *Banlieue / petites villes 2*

Répartition de la **forme urbaine** *Banlieue / petites villes* 2 en 2014

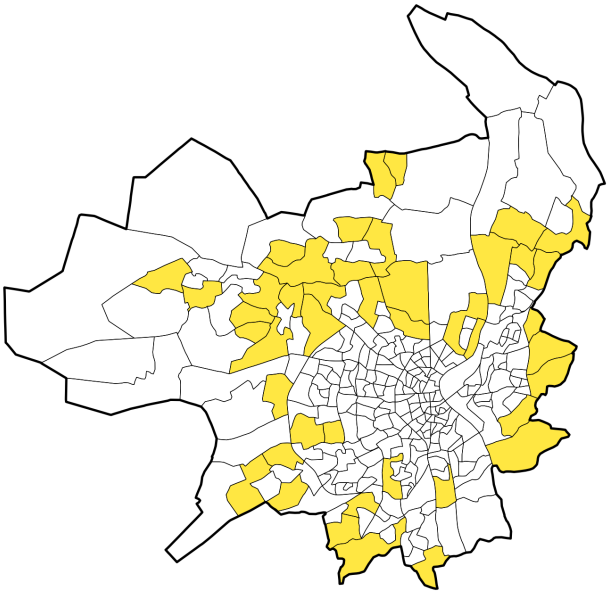


FIGURE E.13 – Carte de répartition de l'archétype *Banlieue / petites villes 2*.

FIGURE E.14 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Banlieue / petites villes 2*.

VIII. Zone d'activités 1

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	4	-	1,444
Aire (km²)	34,927	8,732	6,055
Population	698	174	0,093
Densité (hab/km²)	19,97	19,93	-

TABLEAU E.15 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Zone d'activités 1*

L'archétype *Zone d'activités 1* est particulier en ce qu'il correspond à un cluster de seulement *quatre IRIS*, situés sur les communes de Bordeaux et Blanquefort au nord, et sur celles de Saint-Médard-en-Jalles et Mérignac à l'ouest. De plus, ces IRIS abritent moins de 700 habitants en 2014 : il s'agit bien de quartiers surtout occupés par des entreprises et de la végétation.

Quand on étudie plus précisément les paramètres de l'archétype créé (voir tableau E.16), on remarque qu'une proportion très faible de la superficie est dédiée au bâti et qu'en revanche, une très large partie du territoire n'est pas assignée à l'un ou l'autre des usages (plus de 60 %). Cet occupation par un usage non répertorié est visible sur l'exemple de quartier de cet archétype, certaines portions étant blanches (voir figure E.16). Parmi les autres caractéristiques notables, les parcelles sont de grande taille en moyenne et correspondent aux superficies les plus importantes parmi les archétypes. L'absence d'écoles secondaires témoigne qu'il ne s'agit pas de quartiers habités mais bien d'une zone d'activités abritant des locaux d'entreprises.

Répartition de la **forme urbaine** *Zone d'activités* 1 en 2014

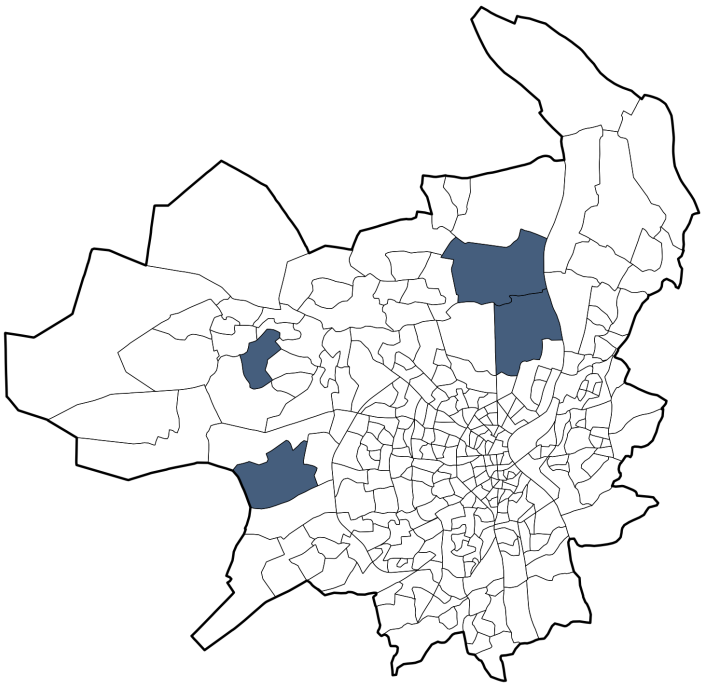


FIGURE E.15 – Carte de répartition de l'archétype *Zone d'activités 1*.

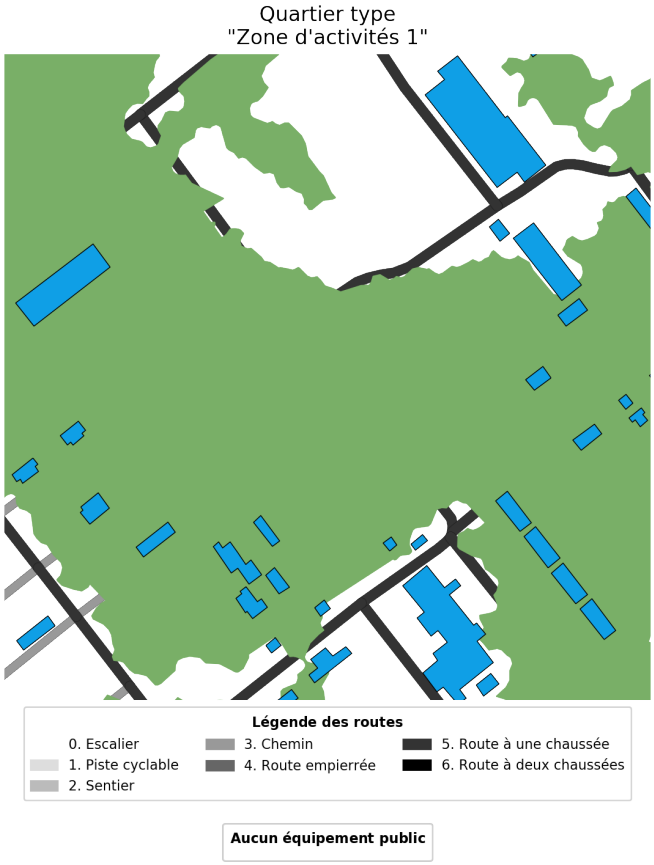


FIGURE E.16 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Zone d'activités 1*.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	2,5658	3,1359	1,3420
Écoles (%)	0,0203	0,0000	0,0406
Végétation (%)	31,1708	22,4674	27,1495
Parkings (%)	2,4922	1,2695	3,4558
Autoroutes (%)	0,1035	0,0000	0,2071
Nationales (%)	0,2223	0,1989	0,2267
Départementales (%)	0,3314	0,1387	0,4913
Autres routes (%)	2,7981	2,6818	1,4157
Non assigné (%)	60,2759	68,4513	28,6194

TABLEAU E.16 – Paramètres de l'archétype *Zone d'activités 1*

IX. Zone d'activités 2

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	29	-	10,469
Aire (km²)	12,619	0,435	2,188
Population	64 217	2 214	8,567
Densité (hab/km²)	5 088,85	5 089,66	-

TABLEAU E.17 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Zone d'activités 2*

Cet archétype a été catégorisé comme *Zone d'activités 2* et correspond à une forme de territoire périurbain où le territoire abrite une proportion importante de terrains bâtis, avec 10,5903 % (7,8979). À la différence de l'archétype *Zone d'activités 1*, cette forme est moins éloignée du centre de la métropole (voir carte E.17) et présente principalement des formes urbaines avec des parcelles de taille moyenne, plutôt allongées en moyenne, correctement desservies par les transports en commun (quelques pourcents de mieux que la moyenne métropolitaine). On y retrouve une variété d'occupation des sols très faibles témoignant de quartiers très homogènes. Une forte proportion des espaces des parcelles sont vides ce qui témoigne que les bâtiments ont une faible emprise sur leur parcelle au vu de la proportion de terrains naturels (16,3345 % avec un écart-type de 7,8627). Cette forme plutôt mixte est difficile à ranger dans un groupe. Nous avons choisie de la labelliser *Zone d'activités 2* au vu des échantillons présentés mais elle aurait pu être également notée *Zone de population mixte*.

Répartition de la **forme urbaine** *Zone d'activités* 2 en 2014

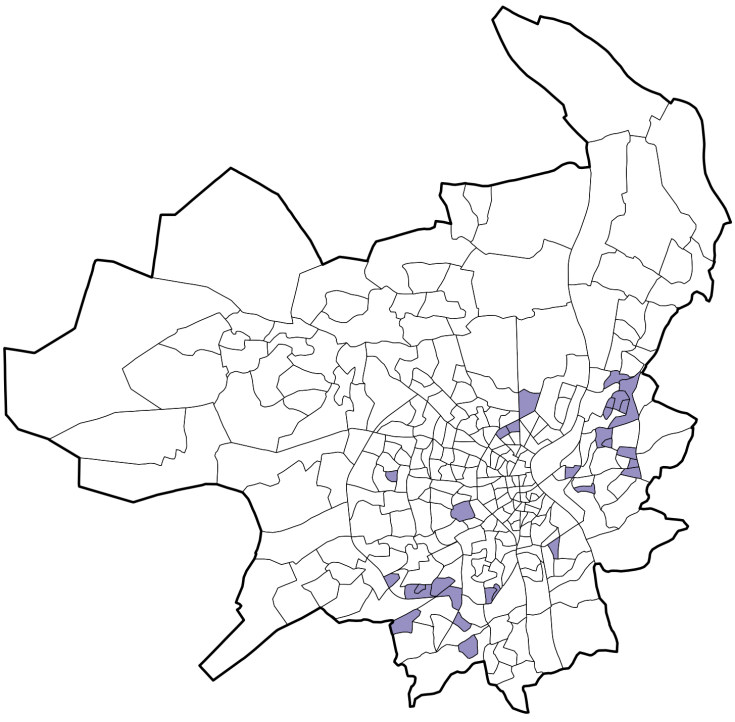


FIGURE E.17 – Carte de répartition de l'archétype *Zone d'activités 2*.

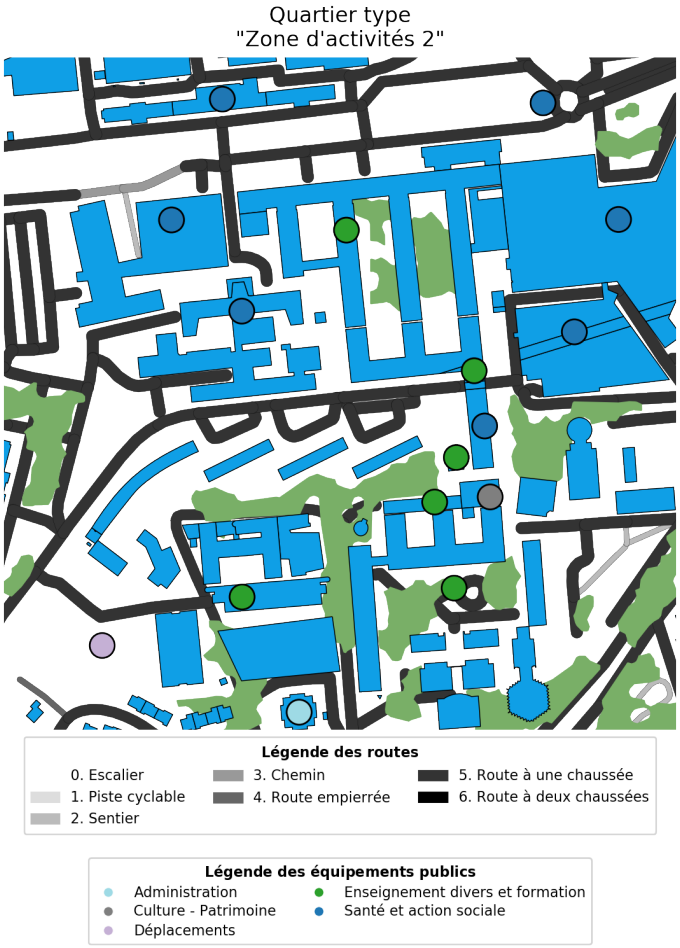


FIGURE E.18 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Zone d'activités 2*.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	10,5903	12,0098	7,8979
Écoles (%)	0,7709	0,4504	1,0985
Végétation (%)	16,3345	15,5283	7,8627
Parkings (%)	2,7108	1,9714	2,5157
Autoroutes (%)	1,2449	0,0000	2,2449
Nationales (%)	0,6390	0,0000	1,0724
Départementales (%)	0,6533	0,3668	0,9427
Autres routes (%)	9,0263	9,0139	2,0328
Non assigné (%)	53,9157	54,0377	5,9537

TABLEAU E.18 – Paramètres de l'archétype *Zone d'activités 2*

X. Ville dense proche 3

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	28	-	10,108
Aire (km²)	14,642	0,523	2,538
Population	82 573	2 949	11,016
Densité (hab/km²)	5 639,62	5 638,62	-

TABLEAU E.19 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Ville dense proche 3*

Le dernier archétype de *formes urbaines* se concentre autour du centre historique de la ville de Bordeaux. Il s'agit d'une forme dense avec une forte proportion de terrain bâti, 26,7188 % (6,6407), et une emprise faible de la végétation avec 10,3837 % (7,6789) de la superficie.

Les IRIS de ce cluster ont des parcelles de petite taille par rapport au reste de la métropole (les seuls archétypes ayant des parcelles plus faibles en moyenne sont *Ville dense proche 1* et *Centre historique*), en grande partie occupées (plus de 93 % en moyenne). Ces quartiers sont en outre bien dotés en écoles du secondaire. Contrairement à l'archétype *Ville dense proche 1* toutefois, l'accès aux transports en commun est moins rapide. Cet archétype correspond à une forme de ville dense mais dans une intensité moins forte que le premier archétype (voir partie I, p. 402).

Répartition de la **forme urbaine** *Ville dense proche* 3 en 2014

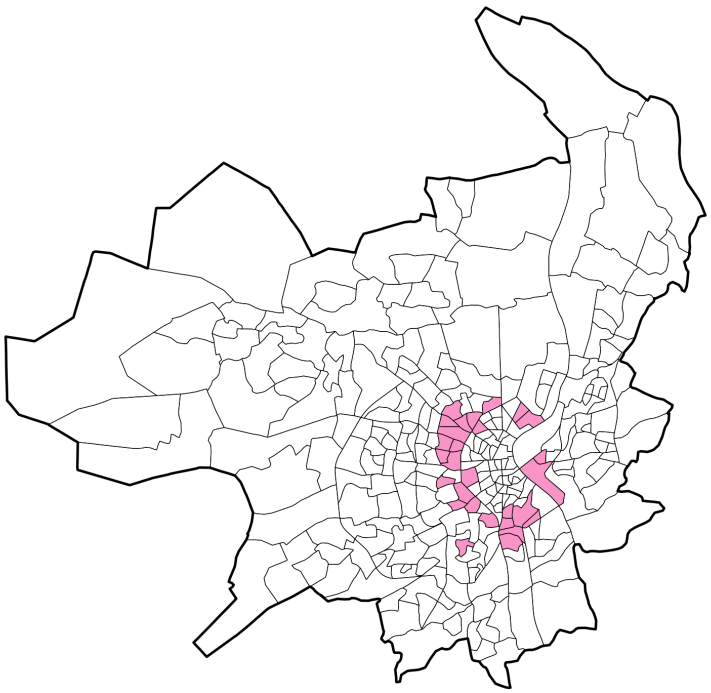


FIGURE E.19 – Carte de répartition de l'archétype *Ville dense proche 3*.

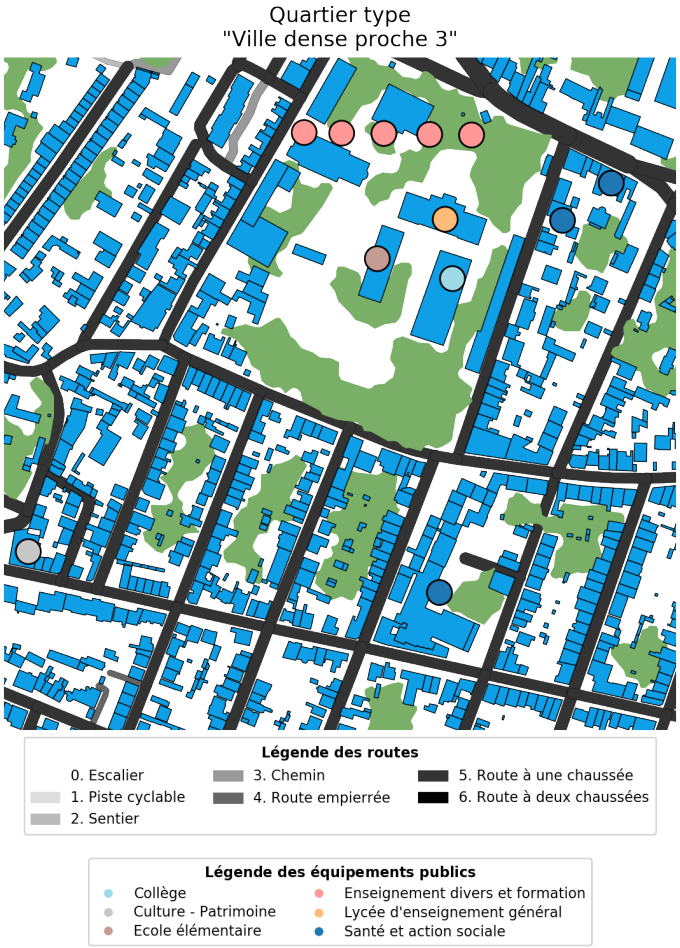


FIGURE E.20 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Ville dense proche 3*.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Logements ou locaux professionnels (%)	26,7188	26,9849	6,6407
Écoles (%)	0,4262	0,1885	0,4865
Végétation (%)	10,3837	8,2424	7,6789
Parkings (%)	2,6279	0,3123	11,2539
Autoroutes (%)	0,0000	0,0000	0,0000
Nationales (%)	0,8307	0,6861	0,8323
Départementales (%)	1,0429	0,7236	0,8465
Autres routes (%)	7,8891	8,1259	1,3669
Non assigné (%)	49,2233	49,0730	9,9097

TABLEAU E.20 – Paramètres de l'archétype *Ville dense proche 3*

Annexe F

Description exhaustive des archétypes de bâtiments

Les pages suivantes présentent les archétypes créés pour les bâtiments. On pourra s'appuyer sur les graphiques de la figure F.2 pour une comparaison plus approfondie des valeurs de chaque archétype selon certains paramètres.

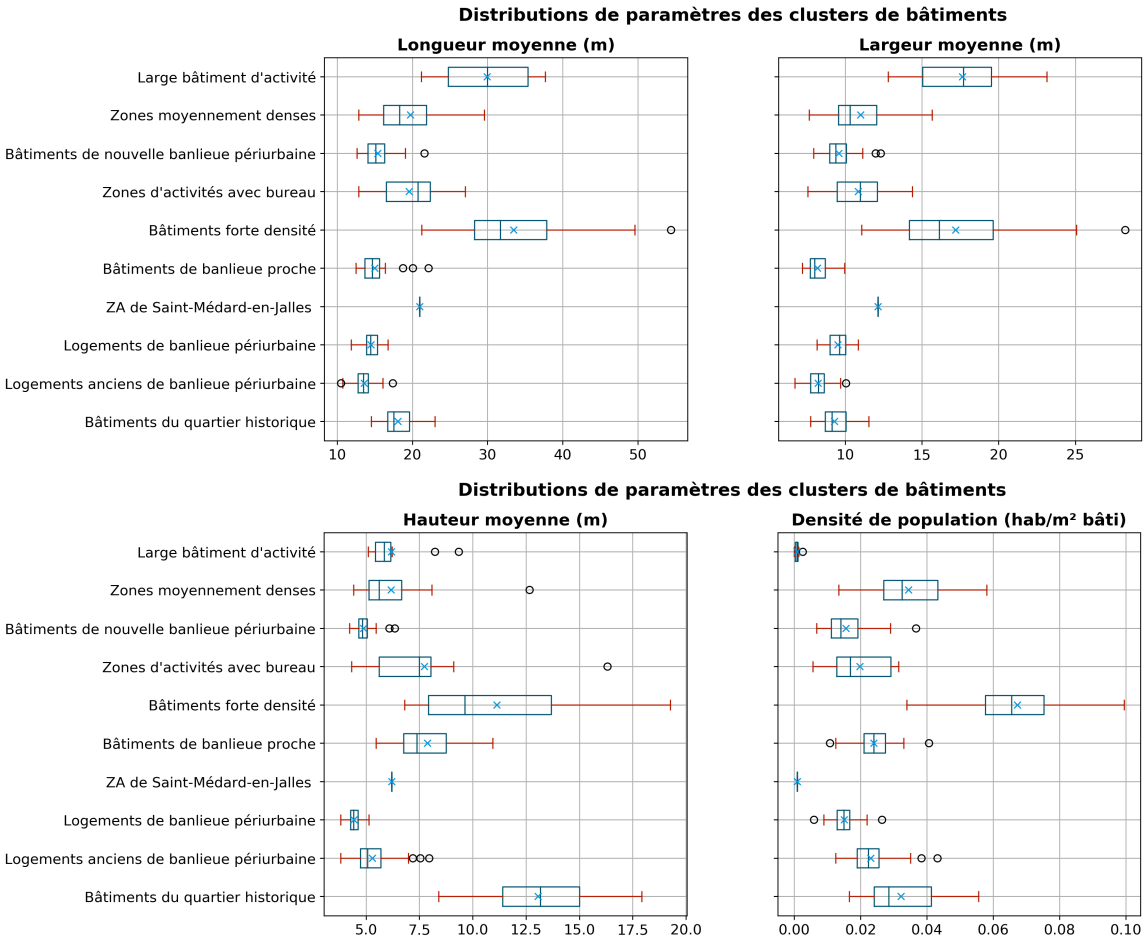


FIGURE F.1 – Quelques distributions de paramètres caractéristiques des bâtiments.

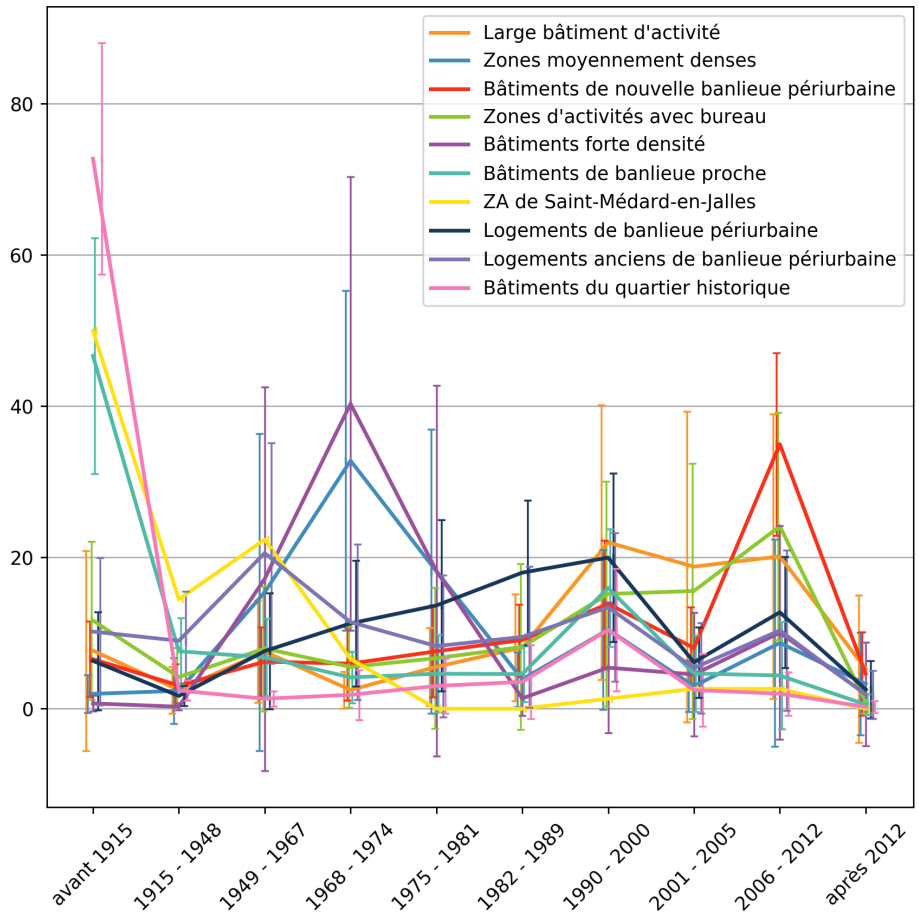


FIGURE F.2 – Distributions de la période de construction des bâtiments classés.

I. Large bâtiment d'activité

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	12	-	4,332
Aire (km²)	62,960	5,247	10,915
Population	3 527	294	0,470
Densité (hab/km²)	56,03	56,02	-

TABLEAU F.1 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Large bâtiment d'activité*

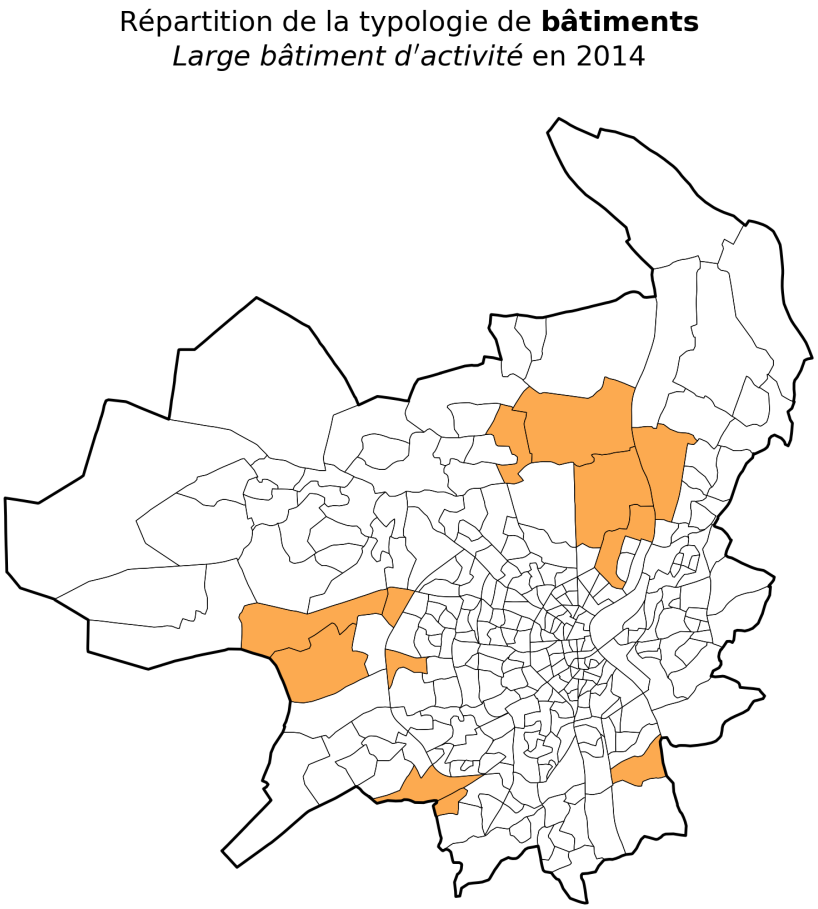


FIGURE F.3 – Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Large bâtiment d'activité*.

Ce premier archétype de bâtiment est visible dans des IRIS répartis dans l'ensemble du territoire de la métropole (voir figure F.3). Il regroupe 12 IRIS recouvrant 56,208 km², soit environ un dixième de la superficie totale de la métropole. 3 527 habitants y sont logés, ce qui est très faible pour la superficie concernée. Les IRIS sont d'une taille moyenne de 4,684 km² ou 468 hectares, correspondant à de larges IRIS [1].

Les bâtiments sont de hauteur moyenne dans l'ensemble, avec une valeur très proche de la moyenne métropolitaine. Néanmoins, les bâtiments, avec des tailles

1. Seuls 25 IRIS sur 277 sont plus étendus que cette moyenne dans la métropole.

au sol de 24 m par 24 m environ, bien au-dessus des 17 m par 10 m en général à Bordeaux, sont bien plus larges que sur l'ensemble de la métropole et utilisent ainsi des volumes importants. Ces locaux, très peu utilisés pour des logements, abritent une part importante d'employés au m², à la fois en industrie et en service.

Cet archétype regroupe des bâtiments plutôt récents, avec des périodes de construction plutôt concentrées entre 1990 et aujourd'hui. En moyenne, seuls 25 % des locaux et logements de cet archétype ont été construits avant 1990. Les efficacités énergétiques forment une cloche autour de la classe D (43,5 % de la surface) avec peu de passoires énergétiques (moins de 3 % en classes F et G en moyenne) mais aussi peu de très bonnes performances (2,2 % de classe A).

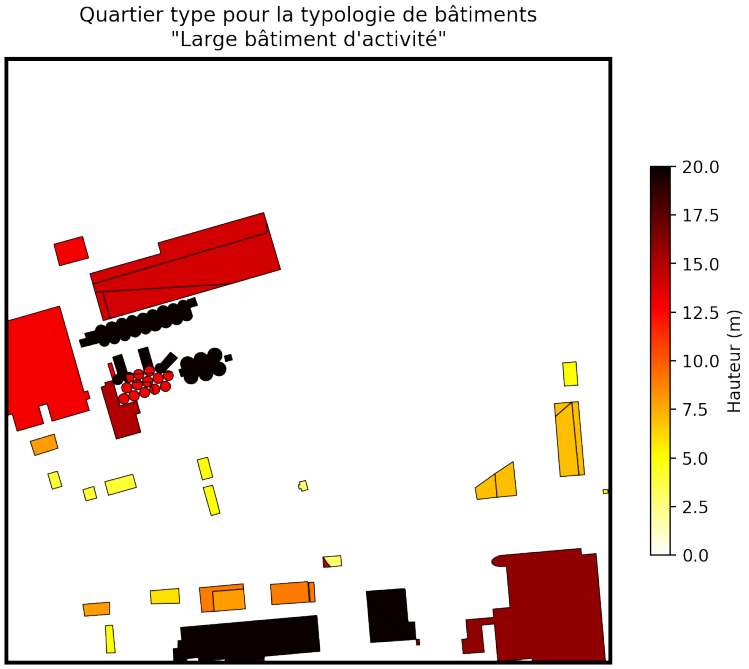


FIGURE F.4 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Large bâtiment d'activité*.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	829,5621	808,6980	700,8286
Nombre d'emplois par km² de bâti	34 162,1458	32 094,9105	18 667,1122
Hauteur moyenne (en m)	6,1914	5,8583	1,2902
Classe énergétique A (%)	2,2361	1,9522	1,4574
Classe énergétique B (%)	10,0638	8,4166	4,8456
Classe énergétique C (%)	27,8187	26,4116	6,6065
Classe énergétique D (%)	43,4907	43,5687	8,1459
Classe énergétique E (%)	13,4675	13,5379	4,5823
Classe énergétique F (%)	2,4239	1,4274	2,0276
Classe énergétique G (%)	0,4988	0,2833	0,6133
Classe énergétique non connu (%)	0,0006	0,0000	0,0018

II. Zones moyennement denses

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	22	-	7,942
Aire (km²)	14,299	0,650	2,479
Population	50 662	2 303	6,759
Densité (hab/km²)	3 543,08	3 543,04	-

TABLEAU F.2 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Zones moyennement denses*

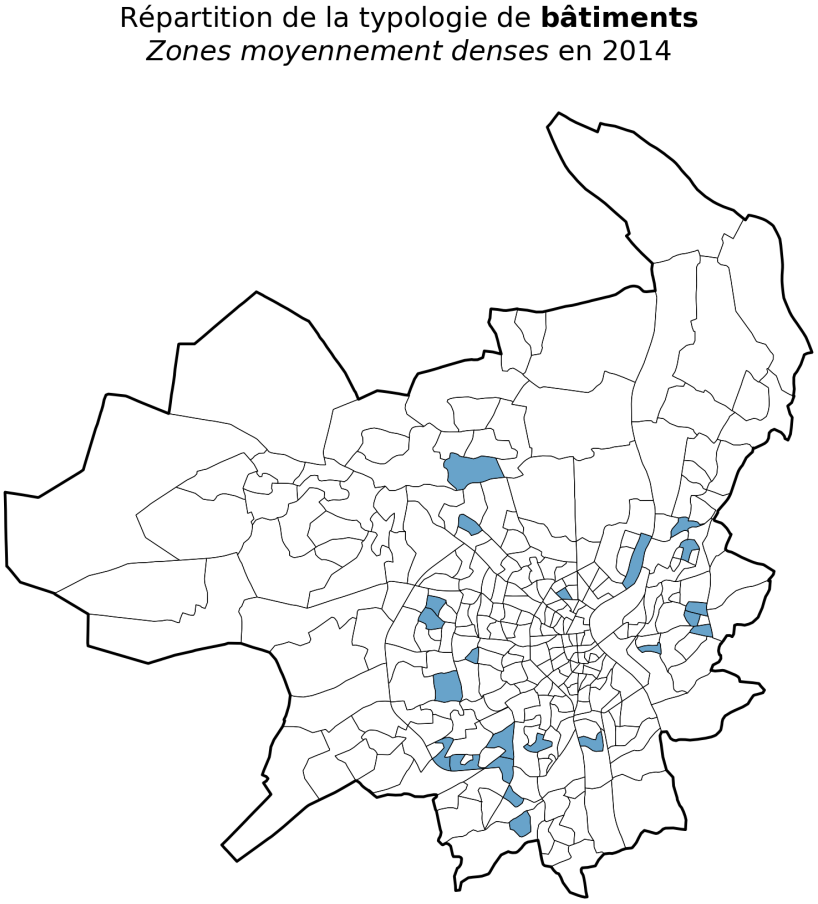


FIGURE F.5 – Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Zones moyennement denses*.

Le deuxième archétype de bâtiments correspond à des IRIS répartis dans la couronne périurbaine de Bordeaux. Il s'agit d'IRIS de taille plus réduite et plutôt denses, avec la densité par emprise la plus élevée après l'archétype *Bâtiments forte densité*. Ils abritent très peu de locaux professionnels et *a fortiori* d'emplois. Les bâtiments de ces quartiers sont de taille et de hauteur moyennes (quelques pourcentages de différence avec la moyenne métropolitaine). Ils ont été construits surtout entre 1949 et 1981. Leurs habitants disposent de moins de voitures que le reste de la métropole avec 75.182 % (10.446) de ménages ayant au moins une voiture contre 79.484 % (15.402) pour la métropole. Par contre, c'est le deuxième groupe de quartiers qui utilise le plus le chauffage collectif proportionnellement

avec 56.802 % (16.793) de résidences principales équipées (85.456 % (12.672) pour l'archétype *Bâtiments forte densité*).

Cet archétype rassemble plusieurs catégories de bâtiments qui sont visibles lors d'une étude plus poussée des profils, à la fois des grands ensembles, assez hauts et étendus, et de nombreuses maisons de quartiers similaires et de petites tailles. Le nom employé n'est pas forcément le plus représentatif mais traduit la diversité à l'intérieur de cet archétype.

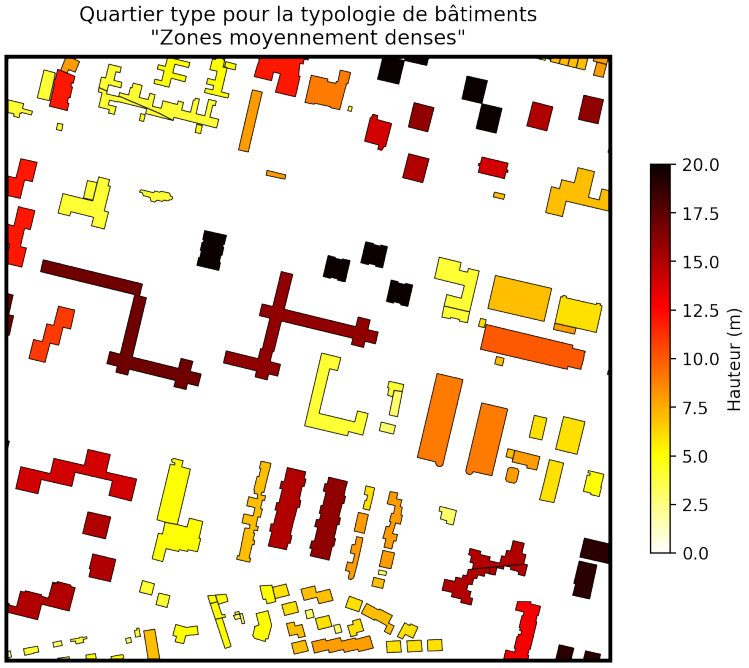


FIGURE F.6 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Zones moyennement denses*.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	34 409,0887	32 515,7705	11 890,2141
Nombre d'emplois par km² de bâti	14 859,1558	7 440,9395	13 956,7437
Hauteur moyenne (en m)	6,1641	5,6130	1,7453
Classe énergétique A (%)	1,0298	0,4366	1,3094
Classe énergétique B (%)	6,0299	4,3063	4,8054
Classe énergétique C (%)	24,4937	22,8841	5,6085
Classe énergétique D (%)	44,7871	45,4121	4,5674
Classe énergétique E (%)	19,0428	19,0232	4,6818
Classe énergétique F (%)	3,7882	3,4556	1,9078
Classe énergétique G (%)	0,8269	0,6418	0,7878
Classe énergétique non connu (%)	0,0016	0,0000	0,0072

III. Bâtiments de nouvelle banlieue périurbaine

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	42	-	15,162
Aire (km²)	160,185	3,814	27,769
Population	139 686	3 326	18,635
Densité (hab/km²)	872,05	872,03	-

Tableau F.3 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Bâtiments de nouvelle banlieue périurbaine*

Cet archétype recouvre un peu plus d'un quart de la superficie de la métropole (27,769 %) pour moins d'un cinquième de la population (18,635 %). Les IRIS concernés sont plutôt de grande taille et situés dans des zones plutôt distinctes : certains sont plutôt en milieu rural comme au nord de la métropole, d'autres sont dans le périurbain de la ville de Bordeaux et les derniers sont plutôt situés sur les centres-villes de communes comme Le-Haillan et Eysines au nord-ouest, et Villenave-d'Ornon au sud. Ces quartiers regroupent très largement des bâtiments de petite taille et d'une hauteur moyenne parmi les plus faibles des archétypes (seuls les bâtiments du cluster *Logements de banlieue périurbaine* sont plus petits en moyenne et en médiane).

Ces bâtiments sont plutôt récents (plus de 47,6 % ont été construits après 2000) et abritent très peu de bâtiments construits avant 1948 (< 10 %). Ils disposent plutôt de systèmes de chauffages individuels. Cet archétype est caractérisé par la possession largement majoritaire d'une place de stationnement (80 411 %, avec un écart-type de 8 046).

Le nombre d'entreprises et de m² de locaux professionnels est faible, tout comme le nombre d'emplois associé. Il s'agit véritablement de bâtiments de logements principalement avec une faible densité.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	15 554,6602	14 081,2360	6 299,2849
Nombre d'emplois par km² de bâti	15 313,8224	14 227,4385	9 496,1957
Hauteur moyenne (en m)	4,8723	4,8241	0,4266
Classe énergétique A (%)	2,3978	1,6828	2,2653
Classe énergétique B (%)	11,4745	9,9753	6,1774
Classe énergétique C (%)	27,7022	27,5515	5,3498
Classe énergétique D (%)	44,3222	44,1703	5,7552
Classe énergétique E (%)	11,7368	11,1332	4,1693
Classe énergétique F (%)	1,8764	1,9363	1,1740
Classe énergétique G (%)	0,4899	0,4036	0,3083
Classe énergétique non connu (%)	0,0002	0,0000	0,0008

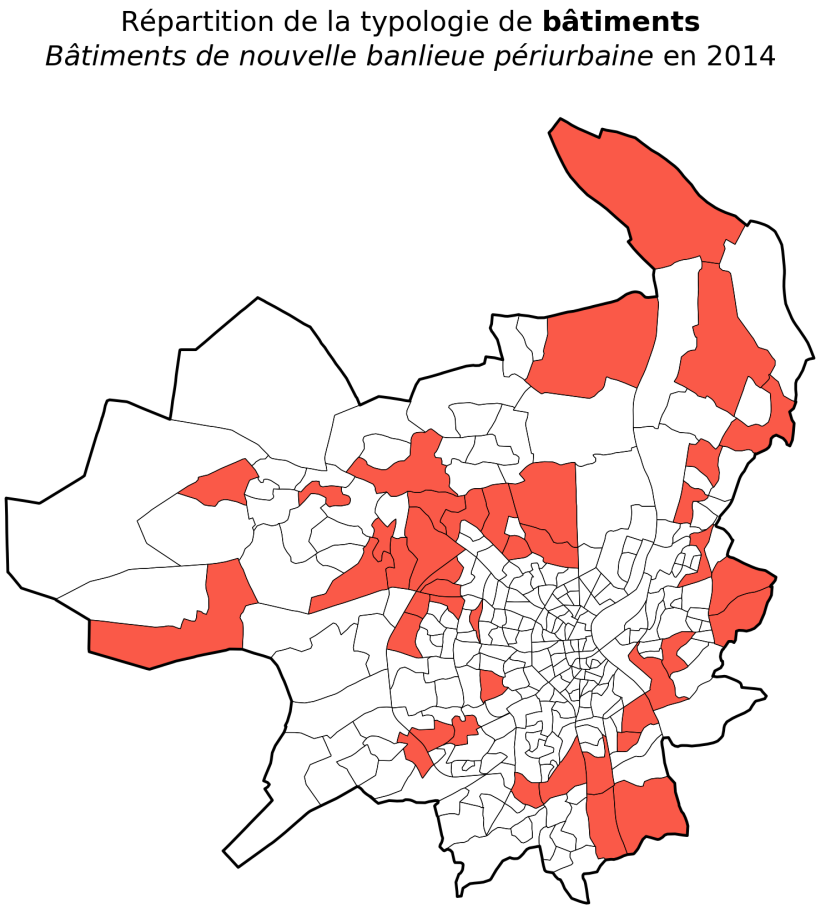


FIGURE F.7 – Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Bâtiments de nouvelle banlieue périurbaine*.

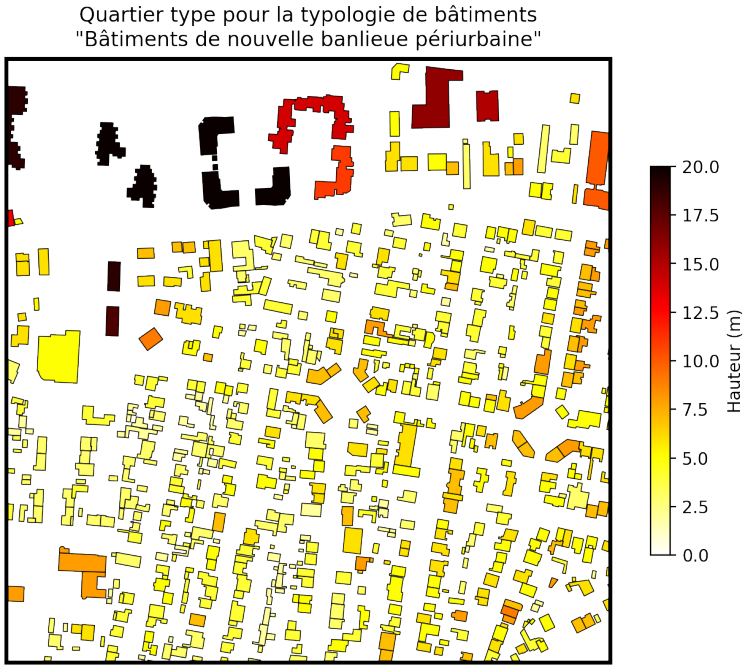


FIGURE F.8 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Bâtiments de nouvelle banlieue périurbaine*.

IV. Zones d'activités avec bureau

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	12	-	4,332
Aire (km²)	14,128	1,177	2,449
Population	35 177	2 931	4,693
Densité (hab/km²)	2 490,23	2 489,88	-

TABLEAU F.4 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Zones d'activités avec bureau*

L'archétype *Zones d'activités avec bureau* concerne un nombre réduit d'IRIS (12) et une petite partie de la surface de la métropole (moins de 2,5 %). Le cluster correspondant rassemble des IRIS plutôt localisés sur le territoire de Bordeaux, à l'exception de trois d'entre eux localisés à Talence, Mérignac et Pessac.

Les bâtiments de cet archétype sont de taille moyenne par rapport à la métropole, avec 7,7281 m (3.0479) contre 6.5425 m (2.9851) pour tout Bordeaux Métropole, ce qui correspond à moins d'un demi-étage. Ils ont été construits pour la majorité (63,0465 %) entre 1982 et 2012. Toutefois, on peut noter qu'environ 11.652 % (10.490) d'entre eux datent d'avant 1915 (ces bâtiments étant probablement ceux proches du centre historique de Bordeaux). Ces formes sont très similaires à la moyenne métropolitaine en termes de performances énergétiques.

La densité de population associée à cet archétype est faible tandis que la proportion d'aire d'entreprise est élevée, conduisant particulièrement à une forte densité d'emplois dans le secteur tertiaire (la densité d'emplois du secteur secondaire est également plus élevée que la moyenne métropolitaine).

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	19 789,2810	16 901,3075	9 506,1995
Nombre d'emplois par km² de bâti	91 765,1483	93 663,9085	34 045,3642
Hauteur moyenne (en m)	7,7281	7,4906	3,0479
Classe énergétique A (%)	1,7725	1,4800	1,2273
Classe énergétique B (%)	8,4413	9,3373	3,2330
Classe énergétique C (%)	22,9301	23,3674	3,7688
Classe énergétique D (%)	45,1544	43,7431	4,6971
Classe énergétique E (%)	17,7494	17,4789	4,6664
Classe énergétique F (%)	3,0851	3,1045	1,3674
Classe énergétique G (%)	0,8651	0,8642	0,5296
Classe énergétique non connu (%)	0,0020	0,0007	0,0030

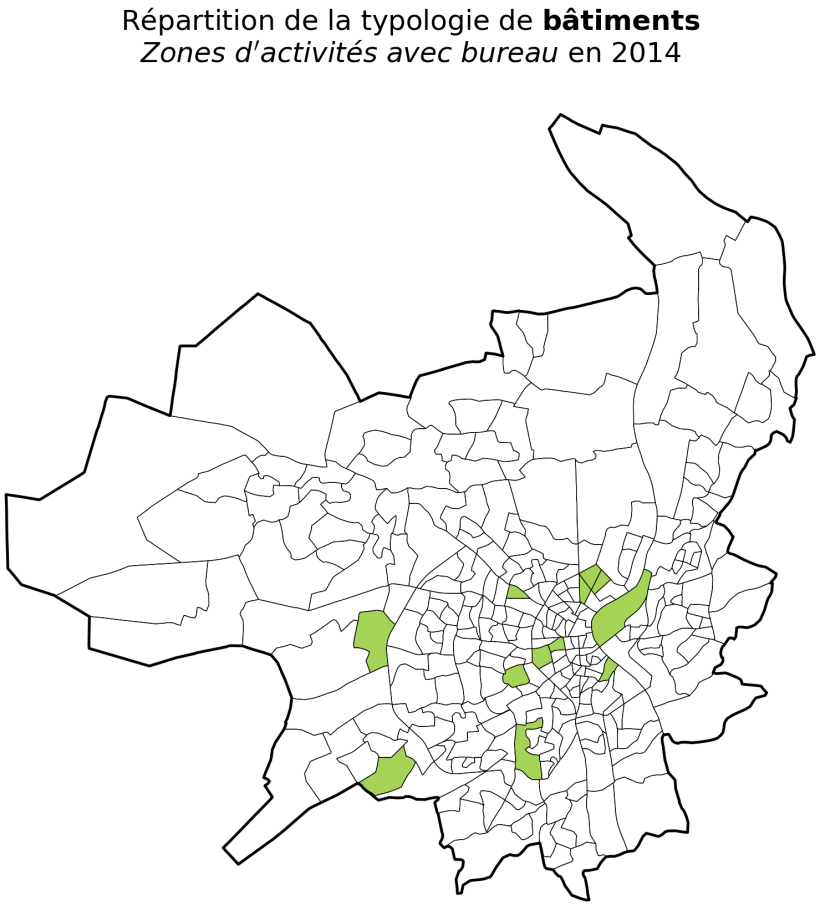


FIGURE F.9 – Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Zones d'activités avec bureau*.

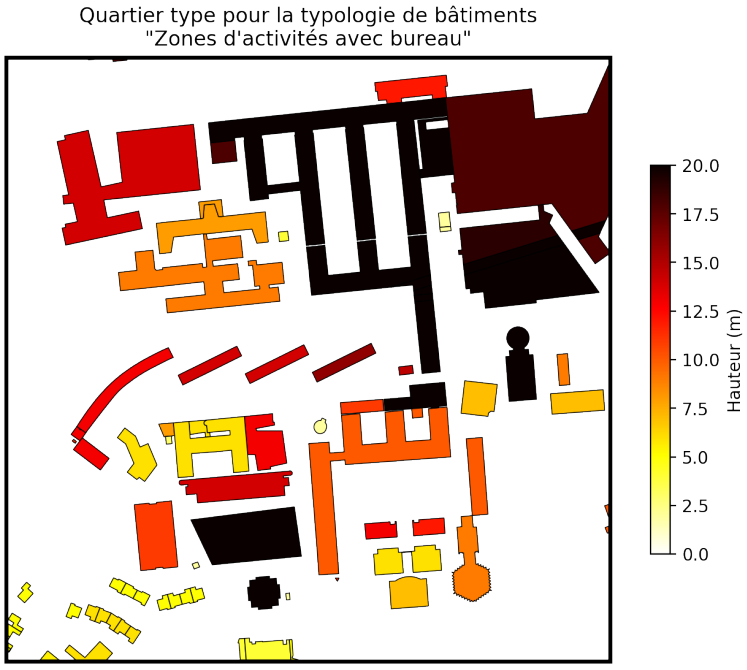


FIGURE F.10 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Zones d'activités avec bureau*.

V. Bâtiments forte densité

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	16	-	5,776
Aire (km²)	4,853	0,303	0,841
Population	40 616	2 539	5,418
Densité (hab/km²)	8 379,54	8 369,26	-

TABLEAU F.5 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Bâtiments forte densité*

Cet archétype de bâtiment est à nouveau largement diffusée dans le territoire autour de Bordeaux (cf. figure F.11). Elle ne regroupe elle aussi que 16 IRIS sur 4,812 km² ou 481 hectares. Elle loge toutefois sur cette surface plus réduite 40 616 habitants en 2014.

Les bâtiments de cet archétype sont également de large taille, tant en surface au sol avec des moyennes comparables à l'archétype précédente, qu'en hauteur avec une moyenne de 11.126 m (3.907), soit environ deux étages de plus que la moyenne métropolitaine. Cette moyenne est vraisemblablement tirée vers le haut par des valeurs extrêmes puisque la médiane du groupe n'est qu'à 9.6 m et que l'écart-type est de 3.9 m. Ce facteur, combiné au faible nombre moyen de bâtiment par IRIS (93 alors que les IRIS en abritent généralement plus de 1 000 dans la métropole) suggère que ces formes correspondent à des tours de logements. En effet, la proportion d'habitants par m² au sol est la plus forte de toute la métropole, doublant la valeur du deuxième archétype utilisant le plus densément le sol. Il y a globalement peu d'employés par m² de bâti.

Ces bâtiments ont globalement été construits entre les années 50 et 80, avec une proportion moyenne de 75 % pour les périodes 1949-1967, 1967-1974 et 1975-1981. Enfin, on peut constater que les systèmes de chauffage utilisés sont principalement collectifs, à 85.456 % (1.057) en moyenne contre 16.351 % (24.740) dans le reste du territoire [2]. Les performances énergétiques sont moins bonnes que celles de l'archétype précédente avec une proportion plus importante (environ 75 %) de bâtiments dans les classes D, E, F et G (contre 60 % pour les *Larges bâtiments d'activités*). Les personnes disposent enfin de très peu de garages proportionnellement au reste de la métropole (seule l'archétype de bâtiments correspondant au centre historique y est moins associée en moyenne).

2. Cette valeur est extrêmement élevée et caractéristique puisque même la médiane métropolitaine est de 4.779 %, témoignant de la majorité écrasante d'utilisation de système de chauffage individuel (électrique ou non).

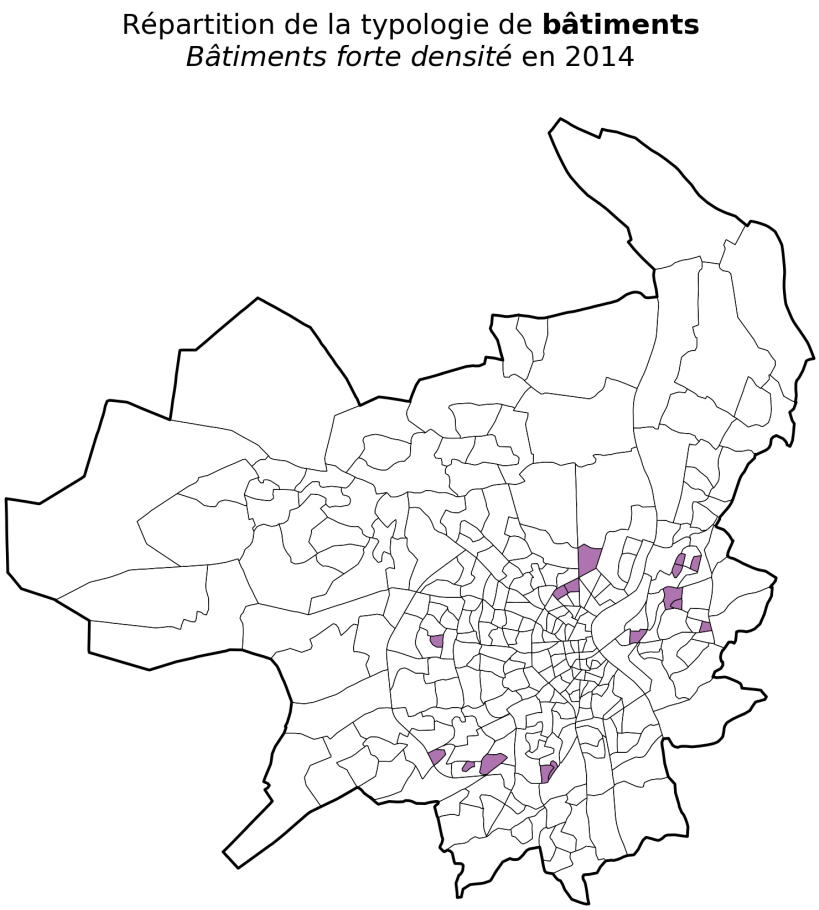


FIGURE F.11 – Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Bâtiments forte densité*.

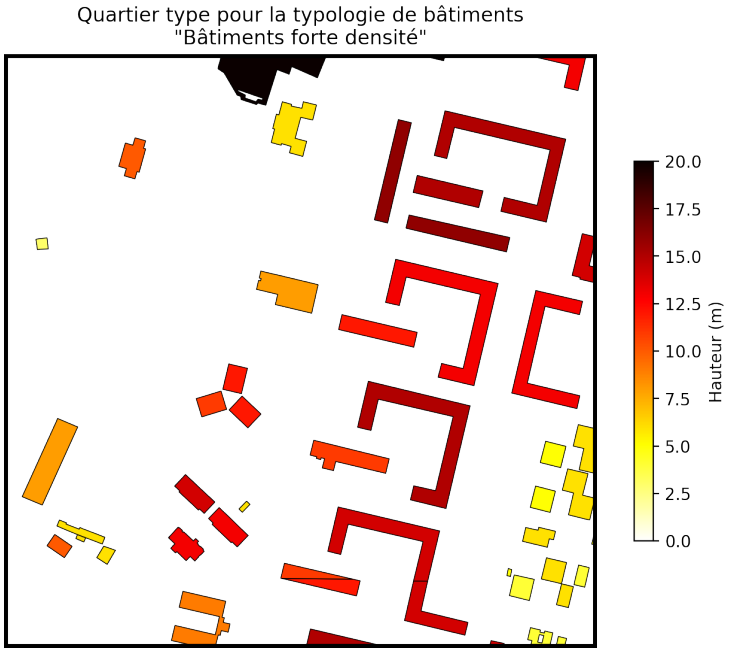


FIGURE F.12 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Bâtiments forte densité*.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	67 251,6671	65 577,8070	18 850,9016
Nombre d'emplois par km² de bâti	18 447,4030	8 357,5270	26 009,7034
Hauteur moyenne (en m)	11,1263	9,6238	3,9073
Classe énergétique A (%)	0,5942	0,2027	1,1619
Classe énergétique B (%)	5,0835	4,2377	4,1316
Classe énergétique C (%)	19,2712	20,3531	4,4904
Classe énergétique D (%)	50,4583	46,8230	10,7469
Classe énergétique E (%)	19,6391	21,3417	6,3703
Classe énergétique F (%)	3,8805	4,0036	2,4578
Classe énergétique G (%)	1,0705	0,6690	1,0517
Classe énergétique non connu (%)	0,0027	0,0000	0,0076

VI. Bâtiments de banlieue proche

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	33	-	11,913
Aire (km²)	13,559	0,411	2,350
Population	95 554	2 896	12,747
Densité (hab/km²)	7 046,23	7 047,27	-

TABLEAU F.6 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Bâtiments de banlieue proche*

Cet archétype concerne la première couronne de quartiers autour du centre historique de Bordeaux. Il rassemble 33 IRIS mais ne recouvre qu'une proportion faible de la métropole (2,350 %). Il abrite également près de 100 000 personnes.

Les bâtiments concernés sont de petite taille (les plus petits après la forme *Logements anciens de banlieue périurbaine*) mais sont tout de même d'une hauteur moyenne de 7.8821 m (1.3442), ce qui en fait le troisième archétype avec la hauteur la plus importante en moyenne. Ils abritent très peu d'emplois proportionnellement. Cet archétype rassemble deux groupes de bâtiments, l'un datant d'avant 1915 (46,656 %) et l'autre plutôt des années 1990-2000 (15,971 %). Plus de la moitié des logements dispose d'un système de chauffage individuel (52.034 % (10.715)). Ces bâtiments disposent proportionnellement très peu de voitures par rapport au reste de la métropole : 69,539 % (6,815) des ménages ont au moins une voiture contre 79,484 % (15,402) pour tout le territoire.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	24 038,3453	23 979,4840	5 978,7186
Nombre d'emplois par km² de bâti	21 659,0341	13 489,7940	19 228,9661
Hauteur moyenne (en m)	7,8821	7,3801	1,3442
Classe énergétique A (%)	5,2583	5,4663	1,6796
Classe énergétique B (%)	6,5229	6,1311	1,1762
Classe énergétique C (%)	19,2860	19,0161	1,4386
Classe énergétique D (%)	38,0661	38,6858	3,2681
Classe énergétique E (%)	22,0875	22,5837	1,5523
Classe énergétique F (%)	6,1090	6,0587	1,0014
Classe énergétique G (%)	2,6672	2,7254	0,7391
Classe énergétique non connu (%)	0,0029	0,0022	0,0025

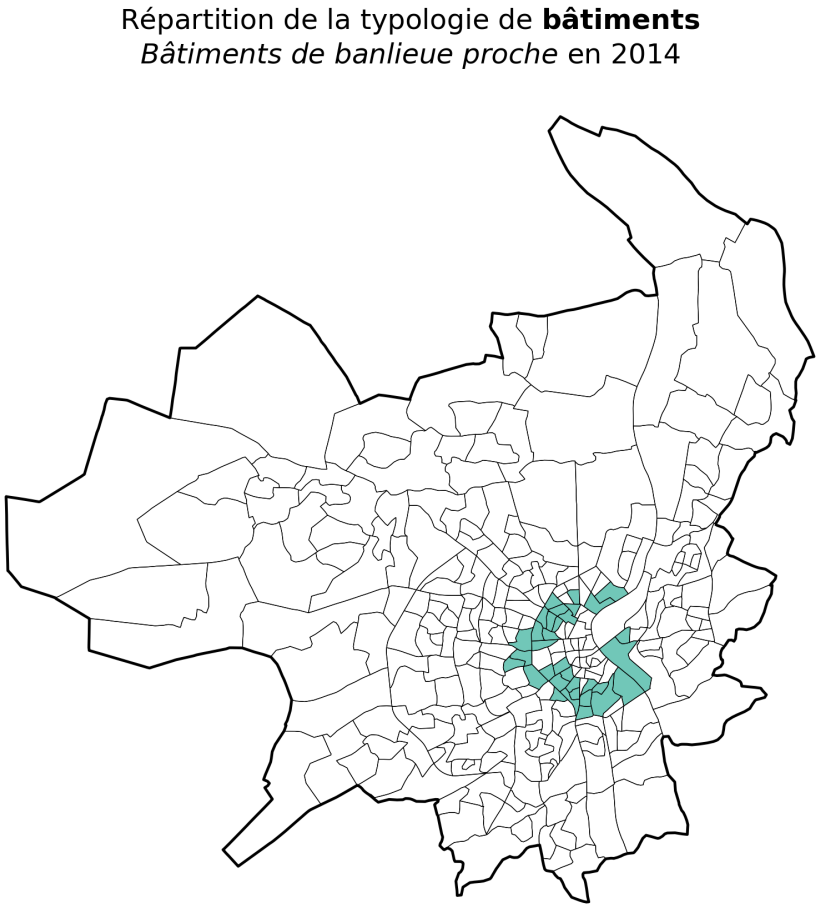


FIGURE F.13 – Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Bâtiments de banlieue proche*.

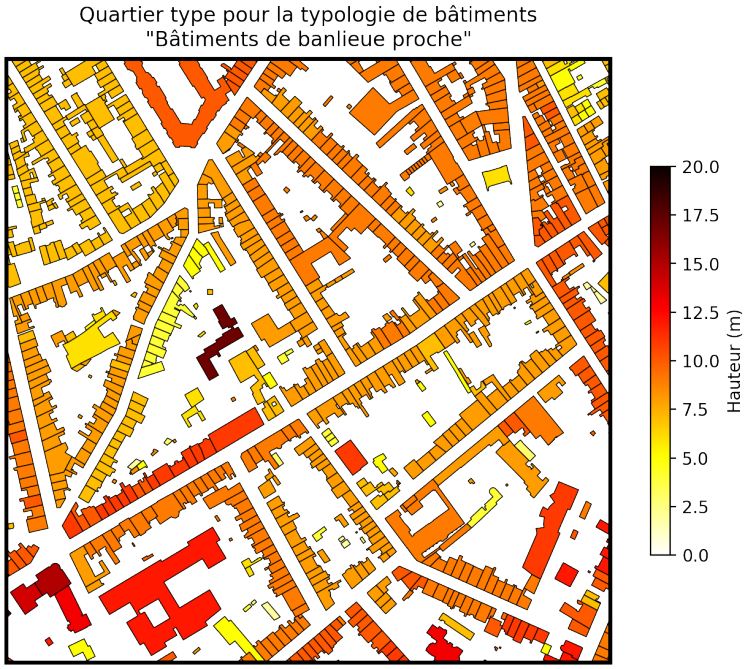


FIGURE F.14 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Bâtiments de banlieue proche*.

VII. ZA de Saint-Médard-en-Jalles

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	1	-	0,361
Aire (km²)	3,406	3,406	0,590
Population	101	101	0,013
Densité (hab/km²)	29,65	29,65	-

TABLEAU F.7 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *ZA de Saint-Médard-en-Jalles*

Cet archétype est particulier et ne concerne qu'un seul IRIS sur l'ensemble du territoire. Quelle que soit la méthode employée, cette forme ressortait des études comme unique. Nous avons choisi de la conserver pour sa spécialisation dans les surfaces d'entreprises et ainsi fournir, éventuellement, à TIMES-URBAN un archétype de locaux professionnels importants.

En effet, il s'agit de la forte densité d'emplois par m², particulièrement dans le secteur secondaire. Les bâtiments de l'IRIS en question ont été construits avant 1915 ou bien entre 1990 et 2012. Ils sont plutôt de grande taille (environ 16,5 m de côté, au-dessus de la moyenne métropolitaine qui est de 10,007 (3,152) pour la largeur et de 17,155 (6,251) pour la longueur) et carrés, et ils abritent très peu de population avec une densité des plus faibles de la métropole.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	939,9310	939,9310	0,0000
Nombre d'emplois par km² de bâti	222 190,7800	222 190,7800	0,0000
Hauteur moyenne (en m)	6,2040	6,2040	0,0000
Classe énergétique A (%)	4,5166	4,5166	0,0000
Classe énergétique B (%)	4,9618	4,9618	0,0000
Classe énergétique C (%)	21,0747	21,0747	0,0000
Classe énergétique D (%)	36,5464	36,5464	0,0000
Classe énergétique E (%)	22,5887	22,5887	0,0000
Classe énergétique F (%)	7,2681	7,2681	0,0000
Classe énergétique G (%)	3,0437	3,0437	0,0000
Classe énergétique non connu (%)	0,0000	0,0000	0,0000

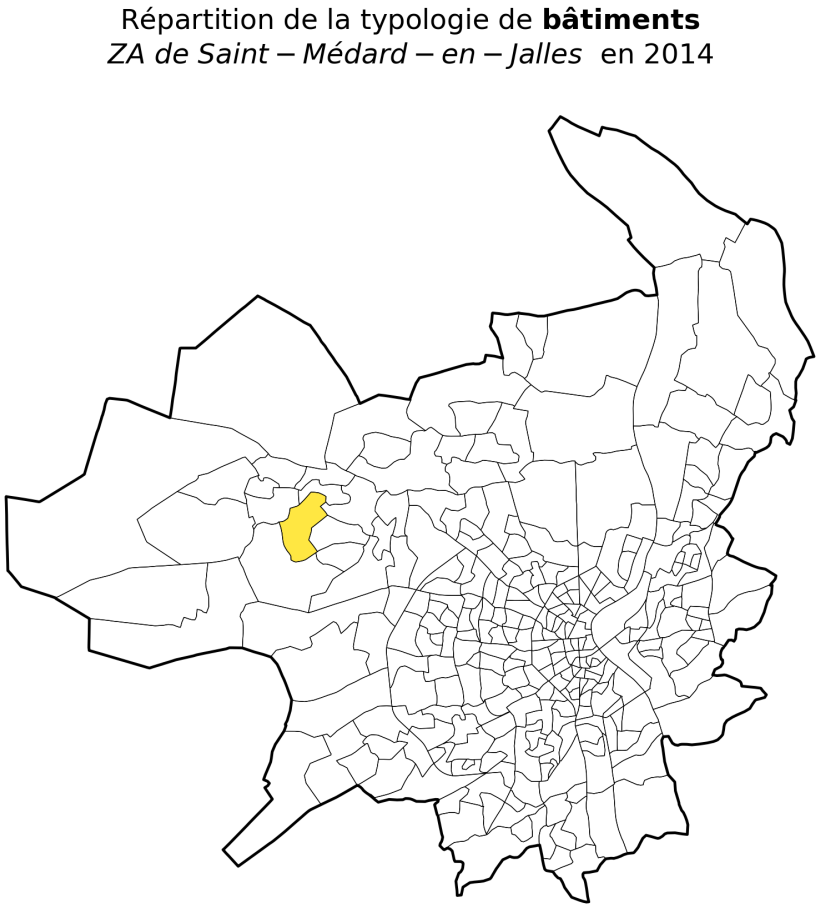


FIGURE F.15 – Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *'ZA de Saint-Médard-en-Jalles'*.

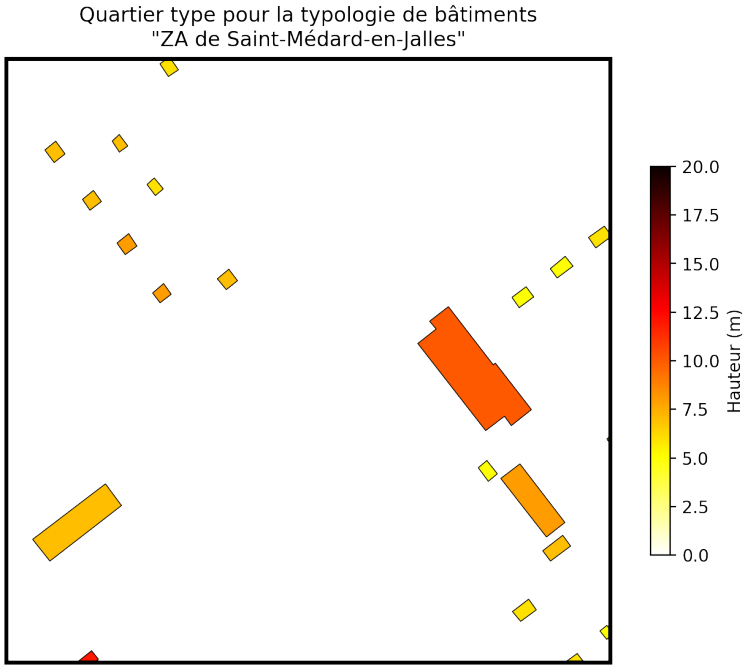


FIGURE F.16 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *'ZA de Saint-Médard-en-Jalles'*.

VIII. Logements de banlieue périurbaine

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	46	-	16,606
Aire (km²)	235,461	5,119	40,819
Population	131 322	2 855	17,519
Densité (hab/km²)	557,73	557,72	-

Tableau F.8 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Logements de banlieue périurbaine*

L'archétype *Logements de banlieue périurbaine*, qui aurait pu s'appeler *Maisons isolées de campagne* est très largement réparti sur le pourtour du territoire de la métropole. Les IRIS associés recouvrent plus de 40 % de la superficie totale de Bordeaux Métropole, ce qui en fait l'archétype le plus étendu en surface en 2014.

Ces bâtiments sont en moyenne les plus proches du carré, avec 1.173 (0.044). Ils sont également les plus bas de tous les archétypes avec 4.436 m (0.322) de hauteur, à mettre en comparaison avec 6.542 m (2.985) pour la métropole entière, et sont particulièrement petits (c'est le troisième archétype avec les valeurs de largeur et longueur moyennes les plus petites après *Logements anciens de banlieue périurbaine* et *Bâtiments de banlieue proche*). La densité de ces bâtiments est plutôt faible par rapport aux autres constructions, ce qui est logique au vu du nombre d'étages. Il s'agit plutôt de maisons individuelles, construites dans la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, qui utilisent des systèmes de chauffage individuel, sont très majoritairement associées à une place de stationnement (à 80,843 % (7,892)) et à la possession d'une voiture (à 93,829 % (3,193)).

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	15 021,0987	14 932,0565	3 565,2317
Nombre d'emplois par km² de bâti	11 245,6399	9 907,3985	8 824,8520
Hauteur moyenne (en m)	4,4364	4,4178	0,3219
Classe énergétique A (%)	1,5982	1,2617	1,1176
Classe énergétique B (%)	7,3227	6,6545	3,1882
Classe énergétique C (%)	27,0908	26,8403	5,7296
Classe énergétique D (%)	46,1478	46,9117	5,5155
Classe énergétique E (%)	14,9315	14,4503	4,8976
Classe énergétique F (%)	2,3459	2,2400	1,1122
Classe énergétique G (%)	0,5627	0,5194	0,3354
Classe énergétique non connu (%)	0,0004	0,0000	0,0011

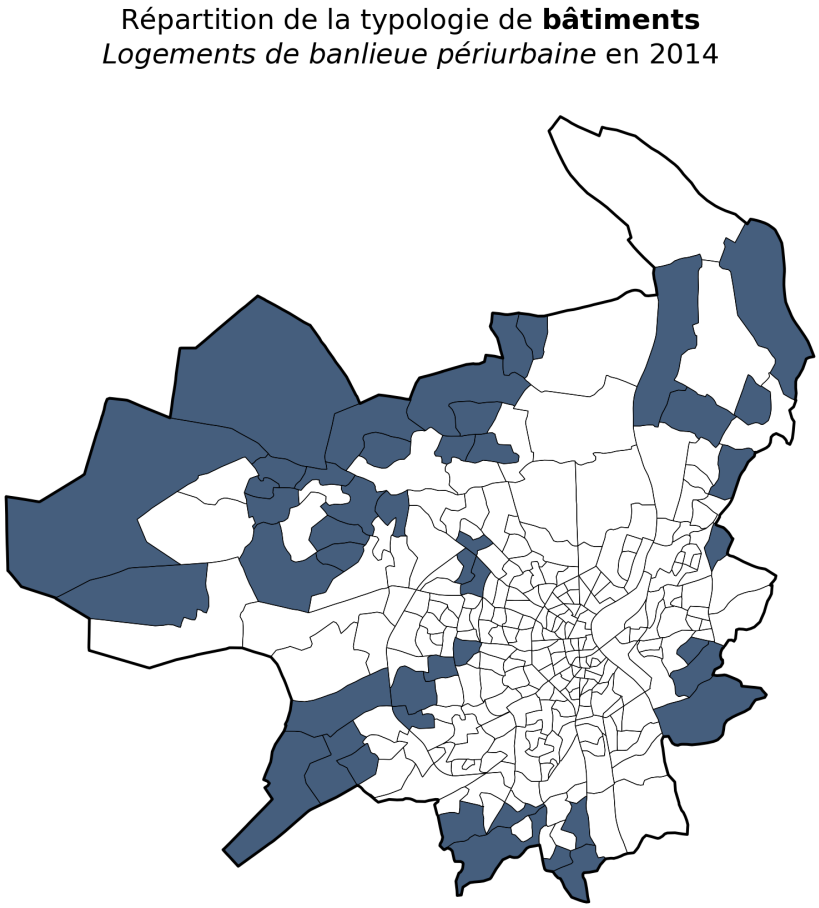


FIGURE F.17 – Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Logements de banlieue périurbaine*.

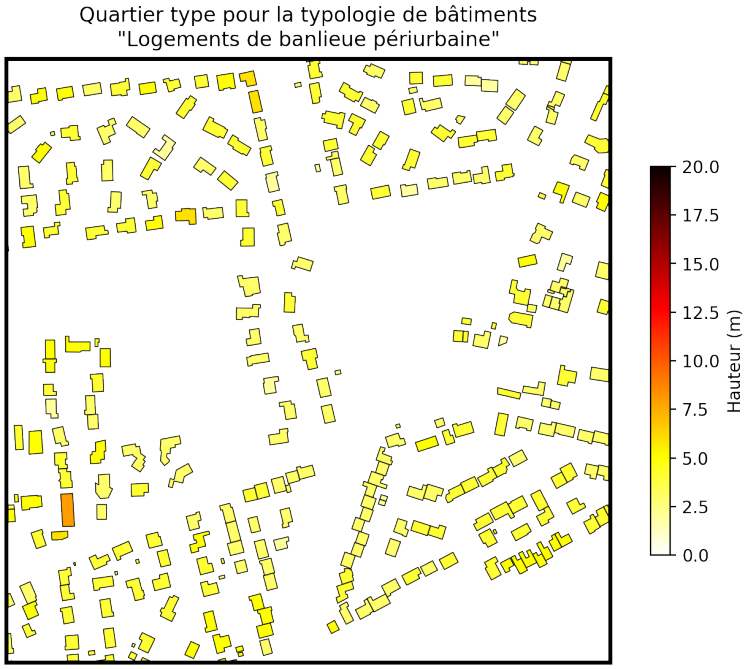


FIGURE F.18 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Logements de banlieue périurbaine*.

IX. Logements anciens de banlieue périurbaine

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	71	-	25,632
Aire (km²)	52,770	0,743	9,148
Population	196 242	2 764	26,180
Densité (hab/km²)	3 720,05	3 718,82	-

TABLEAU F.9 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Logements anciens de banlieue périurbaine*

Cet archétype peut paraître similaire au précédent : les densités sont similaires, à l'exception d'une hauteur moyenne un peu plus importante dans ce cas avec 5.2916 m (0.8459), une répartition parmi les bilans énergétiques similaire. Pour autant, quand on regarde les quartiers concernés, on peut remarquer qu'ils sont situés de façon bien plus resserrée dans la couronne périurbaine entre la rocade et le centre historique de Bordeaux.

Quelles différences pratiques avec l'archétype *Logements de banlieue périurbaine* ? Tout d'abord, il s'agit de bâtiments plus anciens (voir figure F.2, p. 425, au début de cette annexe). Ensuite, on peut noter qu'ils disposent dans une bien moins grande proportion d'une place de stationnement, avec 63.819 % (13.104) contre 80.843 % (7.892) précédemment. Assez logiquement, leurs habitants possèdent moins de voitures (seulement 28.372 % (6.938) des ménages en possèdent 2 ou plus contre 51.963 % (9.855) dans les quartiers de l'archétype *Logements de banlieue périurbaine*). Ce sont donc également des maisons individuelles mais situées dans un contexte différent, plus proches spatialement, et par conséquent historiquement, des centres-villes.

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	23 045,3353	22 347,3620	5 654,8985
Nombre d'emplois par km² de bâti	10 601,6125	8 189,7880	8 040,7152
Hauteur moyenne (en m)	5,2916	5,0717	0,8459
Classe énergétique A (%)	1,5984	1,2076	1,3093
Classe énergétique B (%)	5,6621	5,2457	2,7397
Classe énergétique C (%)	22,9952	21,5678	4,7765
Classe énergétique D (%)	45,0192	44,5801	4,3894
Classe énergétique E (%)	19,9291	20,3094	4,7186
Classe énergétique F (%)	3,8659	3,7714	1,4236
Classe énergétique G (%)	0,9285	0,8685	0,4886
Classe énergétique non connu (%)	0,0016	0,0000	0,0039

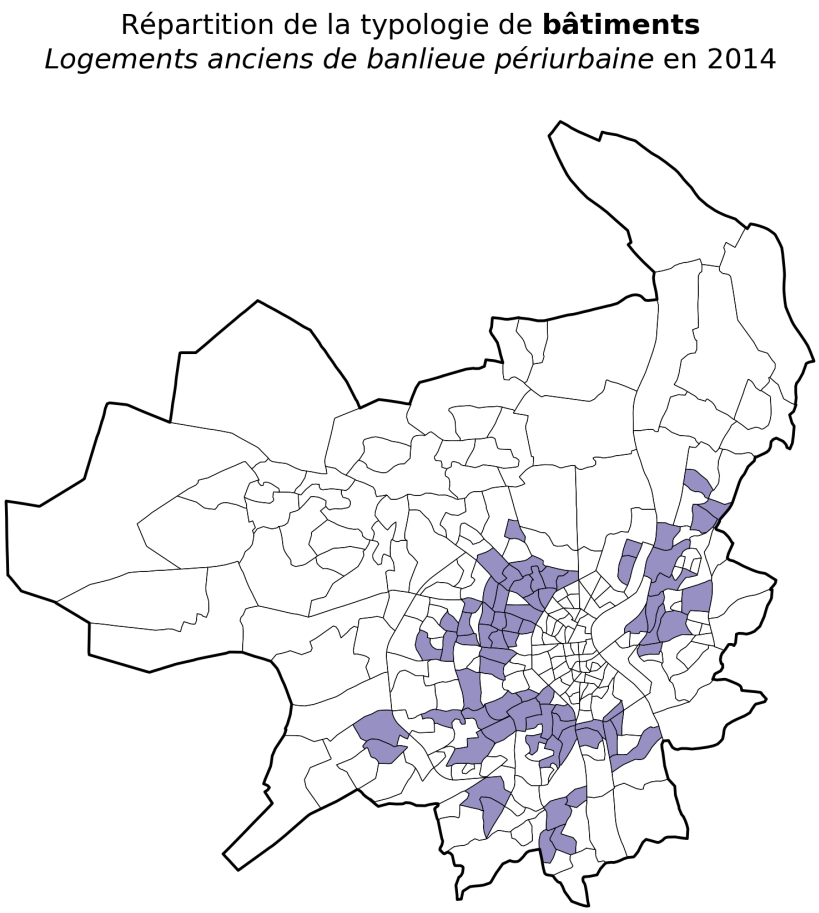


FIGURE F.19 – Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Logements anciens de banlieue périurbaine*.

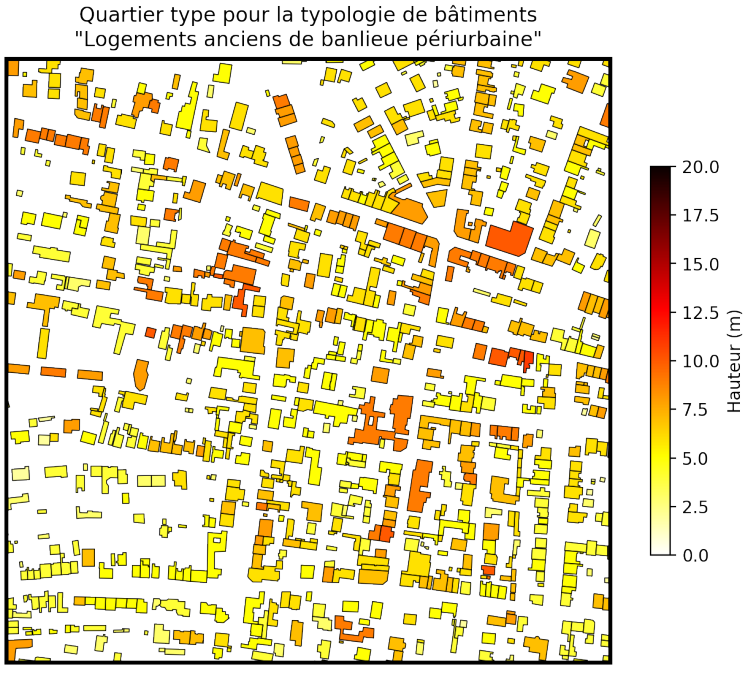


FIGURE F.20 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Logements anciens de banlieue périurbaine*.

X. Bâtiments du quartier historique

Caractéristique	*Total des IRIS*	*Moyenne des IRIS*	*Proportion (en % sur la métropole)*
Nombre d'IRIS	21	-	7,581
Aire (km²)	4,211	0,201	0,730
Population	56 707	2 700	7,565
Densité (hab/km²)	13 432,84	13 466,40	-

TABLEAU F.10 – Caractéristiques du cluster correspondant à l'archétype *Bâtiments du quartier historique*

Ce dernier archétype est le plus facile à identifier et le moins ambigu : concentrés au cœur de la métropole, ces quartiers forment le centre historique de la ville de Bordeaux. Malgré une aire très faible ($\leq$ 1 % de la superficie totale), ils regroupent environ 7,565 % de la population.

Ces bâtiments sont principalement caractérisés par une hauteur moyenne très élevée avec 13.0636 m (2.9556) en moyenne. À cette hauteur importante est logiquement associée une densité de logements, de population et d'emplois importante. Ces bâtiments abritent également une superficie importante de locaux professionnels, témoignant de la mixité d'usage de ce genre de centres-villes. On constate que très peu de ménages disposent d'une place de stationnement (moins de 23 %) ou même d'une voiture (seulement 46,322 % (9,589) disposent d'une voiture ou plus).

En outre, les bâtiments de cet archétype sont très largement anciens, avec 72,736 % (15,306) construits avant 1915, ce qui atteste bien qu'il s'agit des bâtiments historiques. Le reste des bâtiments de ces quartiers datent surtout de la période 1990-2000 avec 10,418 % (8,098).

Paramètre	*Valeur moyenne*	*Valeur médiane*	*Écart-type*
Population par km² de bâti	32 158,6707	28 555,2040	10 674,7874
Nombre d'emplois par km² de bâti	37 179,5556	31 865,9880	31 694,7315
Hauteur moyenne (en m)	13,0636	13,1788	2,9556
Classe énergétique A (%)	8,0324	8,1112	1,6295
Classe énergétique B (%)	7,2694	7,3931	0,6540
Classe énergétique C (%)	18,6817	18,5026	0,9665
Classe énergétique D (%)	33,0368	32,7995	3,4982
Classe énergétique E (%)	21,9193	22,1021	1,0728
Classe énergétique F (%)	7,2303	7,3805	1,0039
Classe énergétique G (%)	3,8287	3,8386	0,7328
Classe énergétique non connu (%)	0,0013	0,0004	0,0024

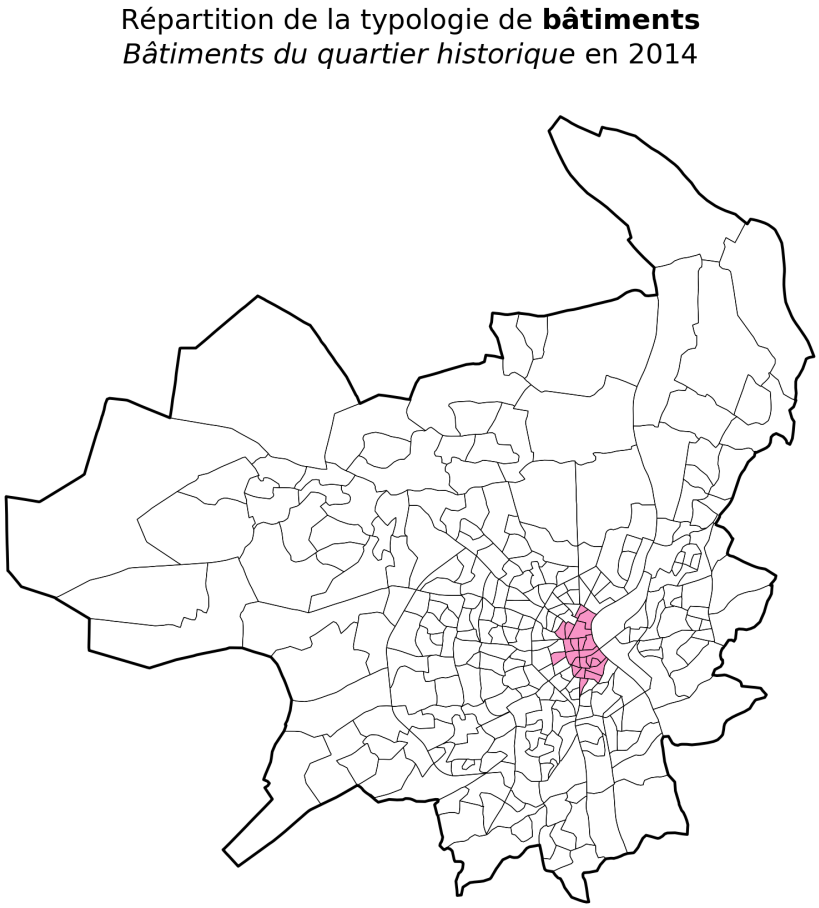


FIGURE F.21 – Carte de répartition des bâtiments de l'archétype *Bâtiments du quartier historique*.

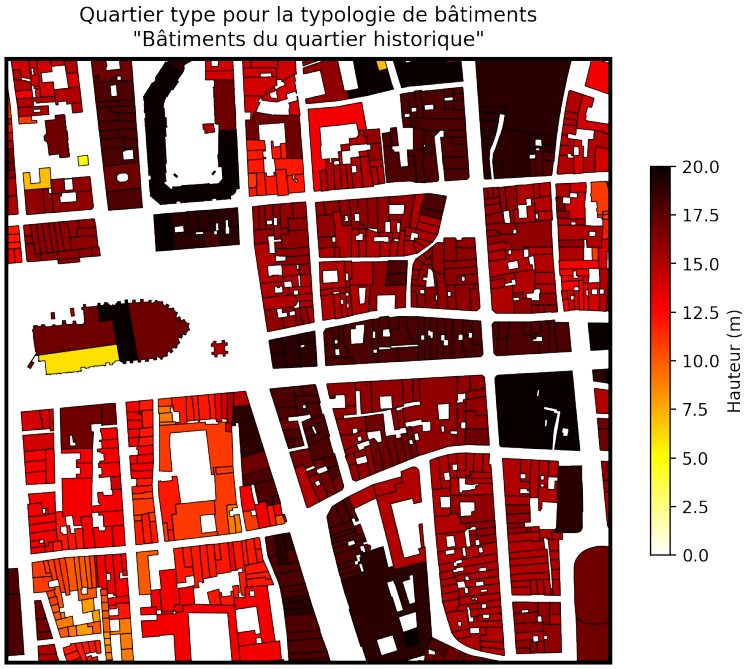


FIGURE F.22 – Zoom sur un des quartiers de l'archétype *Bâtiments du quartier historique*.

Annexe G

Formulation du problème d'optimisation de TIMES-URBAN

Nous allons présenter ici la mise en équations du modèle long-terme TIMES-URBAN décrit dans la section I du chapitre 3, p. 176, afin de mieux en comprendre les procédés de décision. Cette description permet aussi de formaliser le problème posé pour mieux en repérer les limites, les imprécisions et les pistes d'amélioration.

I. Définitions

Établissons tout d'abord quelques notations.

I.1. Ensembles

On note $\mathcal{Z}$ l'ensemble des *zones* de la métropole (19 zones), $\mathcal{S}$ l'ensemble des types d'occupation de sol (6 différentes), $\mathcal{A}$ l'ensemble des *archétypes d'occupation des sols* (qui sont au nombre de 10 [1]), $\mathcal{B}$ l'ensemble des *archétypes de bâtiments* (qui sont au nombre de 10 [2]), $\mathcal{I}$ l'ensemble des *infrastructures de transport* (qui sont au nombre de 4 [3]) et $\mathcal{M}$ l'ensemble des *modes de transport* (qui sont au nombre de 7 [4]).

I.2. Variables et paramètres

Pour simplifier la lecture, les lettres latines (e, c, s...) désignent des paramètres fixes tandis que les lettres grecques λ, γ désignent les variables.

1. Les 10 archétypes de formes urbaines définis statistiquement.
2. Les 10 archétypes de bâtiments définis statistiquement.
3. Autoroute, nationale, départementale et autres.
4. Trois types de voitures, deux types de vélos, un bus et un autocar.

On note ainsi λ_k la *variable de décision* correspondant à la surface (en km²) nouvellement investie pour l'usage $k \in \mathcal{A} \cup \mathcal{B} \cup \mathcal{I} \cup \mathcal{M}$ et γ_k la *variable de décision* lorsqu'il s'agit d'une surface utilisée en pratique (qui comprend donc également les surfaces non modifiées et existant au préalable).

On désigne également les *paramètres* de répartition r, la surface totale de sol disponible s^g, une efficacité e, un coût c et la demande finale en population p.

I.3. Temporalité et spatialité

Chaque choix est celui dans une zone donnée $z \in Z$ à un instant t donné et les variables de décision sont fonction du temps et de la zone, par exemple $\gamma_a(t, z)$. Par souci de simplification, on considérera ici une *zone* et un *instant* particulier, à z et t fixés [5].

Ainsi, l'équation G.1 :

$$\forall t \in \mathcal{T}, \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{a \in \mathcal{A}} \gamma_a(t, i) \leq s^g \tag{G.1}$$

sera affichée (à l'exception de la fonction objectif) de la façon suivante pour ne pas surcharger les équations :

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} \gamma_a \leq s^g \tag{G.2}$$

II. Fonction objectif

Le modèle TIMES-URBAN repose sur une formulation optimale décrite par l'équation suivante [ASSOUMOU (2006) et MILLOT (2019)] :

$$\min \sum_{t \in \mathcal{T}} (1 + d_t)^{REFYEAR - t} \times ANNCOST(t) \tag{G.3}$$

avec

- $REFYEAR$ l'année de référence de l'exercice,
- d_t le taux d'actualisation appliqué,
- $ANNCOST(t)$ le coût annuel de l'ensemble du système qui prend en compte coûts d'investissements et coûts d'activité des technologies.

L'élément important de cette fonction est la définition de $ANNCOST$. Celle-ci peut être décomposée entre les investissements en de nouvelles technologies, résumé par le membre ζ^{inv}, et l'activité des technologies, contenue dans le membre ζ^{act}, soit $ANNCOST = \zeta^{\text{inv}} + \zeta^{\text{act}}$.

5. Pour décrire plus explicitement une représentation intégrant les notions de zone et de décomposition temporelle, on pourra s'appuyer sur la façon dont la succession des technologies se fait dans le générateur de modèles TIMES où investissement, activité et capacité installée sont séparés [LOULOU et al. (2005)].

Si l'on regarde ζ^{inv}, on obtient :

$$\zeta^{\text{inv}} = \sum_{a \in \mathcal{A}} \lambda_a c_a^{\text{inv}} + \sum_{b \in \mathcal{B}} \lambda_b c_b^{\text{inv}} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \lambda_i c_i^{\text{inv}} + \sum_{m \in \mathcal{M}} \lambda_m c_m^{\text{inv}} \tag{G.4}$$

où λ_k est la variable de décision correspondant aux *investissements*, c'est-à-dire la superficie nouvellement investie dans l'archétype, l'infrastructure ou le mode de déplacement, pour $k \in \mathcal{A} \cup \mathcal{B} \cup \mathcal{I} \cup \mathcal{M}$.

Pour l'intégration de l'activité, on a une formule similaire [6] :

$$\zeta^{\text{act}} = \sum_{a \in \mathcal{A}} \gamma_a c_a^{\text{act}} + \sum_{b \in \mathcal{B}} \gamma_b c_b^{\text{act}} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \gamma_i c_i^{\text{act}} + \sum_{m \in \mathcal{M}} \gamma_m c_m^{\text{act}} \tag{G.5}$$

où γ_k est la variable de décision correspondant à l'*activité* des technologies, c'est-à-dire la superficie consommée par l'archétype, l'infrastructure ou le mode de déplacement, pour $k \in \mathcal{A} \cup \mathcal{B} \cup \mathcal{I} \cup \mathcal{M}$.

III. Le secteur urbain

III.1. Les archétypes d'occupation des sols

Les archétypes de *formes urbaines* répartissent le sol brut entre les différentes occupations de sols. Nous définissons $\mathcal{S} = \{rou, nat, bat, pub, pkg, aut\}$ l'ensemble de ces occupations avec :

- rou, une surface de *routes* (qui est constitué en réalité de sol pour autoroute, nationale, départementale et autres) ;
- nat, une surface *naturelle* ;
- bat, une surface *bâtie* pour accueillir des bâtiments ;
- pub, une surface réservée aux *équipements publics* ;
- pkg, une surface utilisée par des *parkings publics* ;
- aut, une surface non assignée, que l'on range dans la catégorie *autres*.

Chaque archétype $a \in \mathcal{A}$ est alors caractérisé par une distribution sous la forme de facteurs r_a^s pour tout $s \in \mathcal{S}$. Ces clés sont fixées par l'étude statistique des quartiers du territoire considéré (*cf.* partie IV.3.a.1 sur la définition des archétypes). Elles vérifient, par conservation de la superficie, l'équation suivante :

$$\forall a \in \mathcal{A}, \sum_{s \in \mathcal{S}} r_a^s = 1 \tag{G.6}$$

6. On aurait pu formuler les variables de décision comme des proportions de sol attribué à l'un ou l'autre usage $s \in \mathcal{S}$ mais la fonction objectif devient alors :

$$\zeta^{\text{act}} = \sum_{a \in \mathcal{A}} \delta_a + \sum_{b \in \mathcal{B}} [\sum_{a \in \mathcal{A}} \delta_a r_a^{bat}] \delta_b + \sum_{i \in \mathcal{I}} [\sum_{a \in \mathcal{A}} \delta_a r_a^{rou}] \delta_i + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{i \in \mathcal{I}} [\sum_{a \in \mathcal{A}} \delta_a r_a^{rou}] \delta_i \delta_m v_i^m$$

La linéarité n'est pas conservée en tant que telle dans cette équation, d'où la formulation proposée plus haut.

De plus, en notant γ_a le nombre de km² occupés par l'archétype de type $a \in \mathcal{A}$ par le type a, on a alors que la superficie attribuée à des archétypes ne dépasse pas la surface totale de la métropole s^g :

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} \gamma_a \leq s^g \tag{G.7}$$

Cette équation traduit la contrainte présentée dans la section I.3.a.

III.2. Les archétypes de bâtiments

Les bâtiments servent de logements et de locaux professionnels [7]. Un bâtiment $b \in \mathcal{B}$ est caractérisé par e_b^{pop} une efficacité qui correspond à une *densité de population*, et e_b^{job} une efficacité qui correspond à une *densité d'emplois*. La *variable de décision* est ici la superficie de bâtiment de chaque type construite, γ_b, en km².

Or, la valeur de sol utilisée par les bâtiments est contrainte par la *superficie disponible* pour la construction de bâtiments. Ces surfaces ont été assignées par les archétypes urbains et les archétypes de bâtiments vérifient donc la *contrainte* suivante [8] :

$$\sum_{b \in \mathcal{B}} \gamma_b \leq \sum_{a \in \mathcal{A}} \gamma_a r_a^{bat} \tag{G.8}$$

La *population* φ_b hébergée par un type de logement $b \in \mathcal{B}$ est la suivante :

$$\varphi_b = e_b^p \gamma_b \tag{G.9}$$

On définit également la *contrainte* sur la population qui s'assure que la *demande finale* de logements soit bien fournie :

$$\sum_{b \in \mathcal{B}} \varphi_b \geq p \tag{G.10}$$

On obtient des équations similaires aux équations G.9 et G.10 pour les *emplois*.

IV. Le secteur du transport

Ce secteur part d'une surface de route disponible, que l'on note ρ_i avec $i \in \mathcal{I}$, obtenue par les archétypes d'occupation des sols :

$$\rho_i = \sum_{a \in \mathcal{A}} \gamma_a r_a^{rou} \tag{G.11}$$

7. On laisse ici les équipements publics de côté : ceux-ci ne sont qu'un cas plus simple des bâtiments de logements et de locaux professionnels.

8. Nous utilisons ici une superficie et non une proportion afin de conserver la linéarité du modèle (voir la note 6, p. 451, pour plus de détail dans le cas similaire des archétypes de *formes urbaines*).

(en milliers de voitures)	**Estimation (rapports nationaux)**	**Résultats de la calibration de TIMES-URBAN**
Essence	138,373	114,935
Diesel	227,920	173,309

TABLEAU G.1 – Stocks pour les véhicules particuliers, comparaison entre valeurs théoriques calculées à partir des stocks nationaux et valeurs obtenues pendant la calibration de TIMES-URBAN (en milliers d'unités).

Cette surface est séparée en plusieurs types d'infrastructures selon une proportion déterminée par les variables de décision γ_i correspondant à chaque type. Pour s'assurer qu'on n'utilise pas plus de terrain que celui rendu disponible par les archétypes, on ajoute la contrainte suivante sur la variable de décision :

$$\forall i \in \mathcal{I}, \gamma_i \leq \rho_i \tag{G.12}$$

Cette surface est transformée par les différents types d'infrastructures à travers des efficacités, e_i^r, qui correspondent à la largeur différente des types de voies (en m par m²) [9]. On obtient donc une longueur pour chaque infrastructure à travers la formule suivante :

$$\forall i \in \mathcal{I}, l_i = e_i^r \gamma_i \tag{G.13}$$

Les infrastructures sont ensuite converties selon les modes en infrastructure utilisable ou non. Ce passage permet notamment de préciser que certains modes, le vélo par exemple, ne peuvent pas se déplacer sur toutes les infrastructures. On a donc, avec γ_i^m la longueur d'infrastructure i utilisée pour le mode m qui vérifie :

$$\forall i \in \mathcal{I}, \sum_{m \in \mathcal{M}} \gamma_i^m \leq l_i \tag{G.14}$$

Cette répartition est limitée par les efficacités des modes sur les types :

$$\forall m \in \mathcal{M}, \forall i \in \mathcal{I}, \gamma_i^m \leq l_i \frac{v_i^m}{\max_{(j,n) \in \mathcal{I} \times M} v_j^n} \tag{G.15}$$

La variable de décision associée à un mode est le nombre d'engins investis (en milliers d'unités), contenu dans γ_m. Chaque mode de transport $m \in \mathcal{M}$ peut produire un déplacement δ_m^{courte} (resp. δ_m^{longue}) avec l'efficacité e_m^{courte} (resp. e_m^{longue}) selon l'équation $\delta_m^{\text{courte}} = \gamma_m e_m^{\text{courte}}$ (resp. $\delta_m^{\text{longue}} = \gamma_m e_m^{\text{longue}}$) où le facteur e_m^{courte} (resp. e_m^{longue}) rend compte du taux de remplissage du mode (1 pour un piéton, 1,55 pour une voiture particulière, 15 pour un mode commun), de la disponibilité annuelle (en nombre de km) et de la répartition entre courte et longue distances. Les modes de transport consomment du temps à travers une efficacité t_m et de l'infrastructure à partir d'une efficacité $e_m^i, \forall i \in \mathcal{I}$. Il est intéressant de remarquer qu'avec les simplifications faites et les choix de modélisation, on aboutit toutefois à un stock proche du stock réel (*cf.* le tableau G.1).

On fait le lien entre l'utilisation d'un mode de déplacement, contenu dans γ_m, et la production d'un type d'infrastructure pour une forme de mobilité, contenue

9. La section I.2.b donne plus de détails sur les efficacités et sur la construction du modèle, la version présentée ici étant en partie simplifiée.

dans γ_i^m en utilisant l'efficacité d'infrastructure :

$$\forall m \in \mathcal{M}, \gamma_m \leq \sum_{i \in \mathcal{I}} \gamma_i^m e_m^i \tag{G.16}$$

Il ne reste plus qu'à fixer la contrainte de demande finale de ce secteur, pour les courtes et longues distances :

$$\forall \lambda \in \{\text{longue}, \text{courte}\}, \sum_{m \in \mathcal{M}} \delta_m^\lambda \geq p_\lambda \tag{G.17}$$

Enfin, une dernière *contrainte* impose le respect du *budget temps* [10] :

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \frac{\delta_m^{\text{courte}} + \delta_m^{\text{longue}}}{e_m^t} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \gamma_m \frac{e_m^{\text{courte}} + e_m^{\text{longue}}}{e_m^t} \leq B_{temps} \tag{G.19}$$

10. On peut également considérer que minimiser le budget temps peut être un objectif et dans ce cas ajouter la valeur du budget temps à la fonction objectif. Toutefois, il faut faire attention à convertir ce facteur temps afin d'avoir un réel arbitrage. On pourrait par exemple ajouter le facteur suivant à la fonction objectif :

$$\tilde{z} = z + \Delta_T \sum_{m \in \mathcal{M}} \frac{\delta_m}{e_m^t} \tag{G.18}$$

avec $\Delta_T = K_T \epsilon_T$, K_T étant un facteur de conversion entre temps et fonction objectif et ϵ_T arbitraire permettant de pondérer avec plus ou moins d'importance le temps dans la fonction objectif. Néanmoins, ce n'est pas le choix que nous avons fait ici, préférant utiliser comme budget temps les résultats des enquêtes sur la métropole de Bordeaux et laissant à d'éventuels développements futurs une étude plus poussée de l'influence des modes de vie sur ce secteur.

Annexe H

La définition de contraintes dans TIMES

Cette annexe décrit rapidement les méthodes de construction des contraintes dans le générateur de modèles TIMES.

L'effet des contraintes dans TIMES est multiple : s'assurer du bon fonctionnement du modèle [1], faciliter la résolution mathématique ou la création d'heuristiques, améliorer la fiabilité et le réalisme d'un modèle en ne permettant que des valeurs réalistes (ou semblant telles). Les nombreuses contraintes présentes dans les modèles (visibles dans les équations) peuvent donc avoir plusieurs utilités différentes et représentent une partie primordiale de la modélisation. Plusieurs méthodes sont applicables pour ajouter des contraintes dans le framework TIMES.

I. Les contraintes de base

Defines available surface

					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
				Aire	2.8999	5.2993	10.124	7.1628	6.249	17.958	19.468	20.188	12.011	8.3622	14.108	29.275	22.032	74.742	56.012	36.456	119.791	80.907	33.801
				Aire sans eau	2.4941	4.981	10.098	6.819	4.7603	14.983	18.037	20.039	11.978	8.3365	13.024	28.651	20.292	59.451	50.498	36.269	119.384	80.368	32.568
~TFM_INS																							
Time	Lim	T	Attribute	Year	Attri	Val	Allt	BDX01	BDX02	BDX03	BDX04	BDX05	BDX06	BDX07	BDX08	BDX09	BDX10	BDX11	BDX12	BDX13	BDX14	BDX15	BDX16	BDX17	BDX18	BDX19	Pse	Pset_PN
	FX		ACT_BND	2014				2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	14.983	18.037	20.039	11.978	8.336	13.024	28.651	20.292	59.451	50.498	36.269	119.384	80.368	32.568		P_BUI_IMPORT_SURFACE
	FX		ACT_BND	2015				2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	14.983	18.037	20.039	11.978	8.336	13.024	28.651	20.292	59.451	50.498	36.269	119.384	80.368	32.568		P_BUI_IMPORT_SURFACE
	FX		ACT_BND	2016				2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	14.983	18.037	20.039	11.978	8.336	13.024	28.651	20.292	59.451	50.498	36.269	119.384	80.368	32.568		P_BUI_IMPORT_SURFACE
	FX		ACT_BND	2017				2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	14.983	18.037	20.039	11.978	8.336	13.024	28.651	20.292	59.451	50.498	36.269	119.384	80.368	32.568		P_BUI_IMPORT_SURFACE
	FX		ACT_BND	2018				2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	14.983	18.037	20.039	11.978	8.336	13.024	28.651	20.292	59.451	50.498	36.269	119.384	80.368	32.568		P_BUI_IMPORT_SURFACE
	FX		ACT_BND	2019				2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	14.983	18.037	20.039	11.978	8.336	13.024	28.651	20.292	59.451	50.498	36.269	119.384	80.368	32.568		P_BUI_IMPORT_SURFACE
	FX		ACT_BND	2020				2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	14.983	18.037	20.039	11.978	8.336	13.024	28.651	20.292	59.451	50.498	36.269	119.384	80.368	32.568		P_BUI_IMPORT_SURFACE
	FX		ACT_BND	2021				2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	14.983	18.037	20.039	11.978	8.336	13.024	28.651	20.292	59.451	50.498	36.269	119.384	80.368	32.568		P_BUI_IMPORT_SURFACE

FIGURE H.1 – Exemple d'ajout de contrainte par TFM_INS sur l'activité d'un process.

La façon la plus simple de créer une contrainte dans TIMES est d'utiliser les contraintes prédéfinies par les concepteurs. Pour cela, l'outil permet d'assigner une valeur à une variable appelé ACT_BND (pour l'activité), CAP_BND (pour la capacité installée), NCAP_BND (pour les nouveaux investissements), COM_BNDNET (pour

1. Par exemple, les modèles de la famille TIMES reposent sur le principe qu'un process produit et consomme des commodités, avec une certaine efficacité. Il faut donc créer les contraintes internes pour s'assurer que ce principe est respecté, que les niveaux de production et de consommation sont conformes aux limites des process, que l'activité est correctement calculée, que celle-ci ne dépasse pas la capacité installée, etc. En résumé, de très nombreuses contraintes sont internes au fonctionnement du cœur du modèle. La simple définition des flux de sortie et d'entrée des process prend environ 114 000 lignes sur les quelques 1 531 999 lignes du code GAMS résultant d'une des versions du modèle.

les *émissions* nettes d'une commodité), `COM_BNDPRD` (pour la production d'une commodité), etc. Cette variable est utilisée ensuite dans la génération d'équations pour limiter les paramètres correspondants. La table `TFM_INS` permet ce genre de choses de la façon présentée dans l'image H.1 : on spécifie le type de limite (`FX` pour égalité, `UP` pour limite supérieure, `LO` pour limite inférieure), l'année concernée, l'attribut concerné, la valeur pour chacune des zones (ou pour l'ensemble des zones), et le process ou la commodité concerné. Dans certains cas, la valeur aura déjà été préalablement fixée (soit dans la description de l'année de référence, soit dans un autre fichier de nouvelles technologies) et il faudra utiliser la table `TFM_UPD` (pour *update*, là où `INS` faisait référence à *insertion*) et procéder de façon similaire. Cela reviendrait, par exemple par un procédé légal, à fixer une limite supérieure à certains usages.

II. Les contraintes utilisateurs

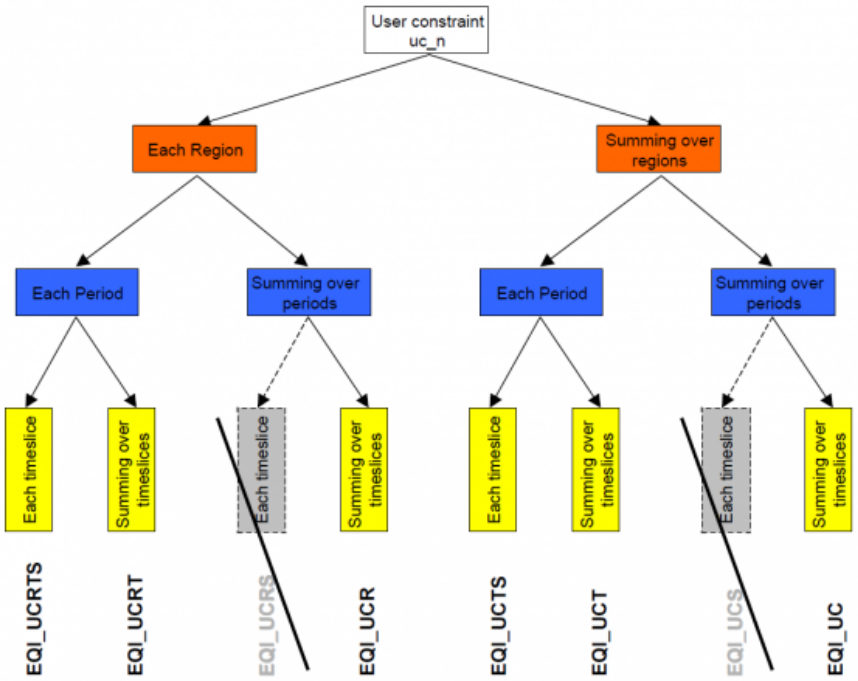


FIGURE H.2 – Différents cas d'application des contraintes utilisateurs en termes d'échelles spatiales et temporelles (source : documentation officielle d'octobre 2016).

L'autre technique principale est de créer une contrainte dite « *utilisateur* » (UC ou *user constraint*). Il s'agit cette fois de créer une équation à partir de la combinaison de plusieurs paramètres. Cette contrainte peut s'appliquer à l'ensemble des zones en faisant la somme des valeurs des paramètres concernés ou sur chaque zone séparément, sur l'ensemble des décompositions temporelles ou sur chacune d'entre elle, comme le montre la figure H.2 issue de la documentation officielle. Pour le choix des processes et des commodités, plusieurs colonnes sont à disposition :

- PSet_PN, pour filtrer les processes par leur **nom** ;
- PSet_CI, pour filtrer les processes sur les noms des **commodités entrantes** ;
- PSet_CO, pour filtrer les processes sur les noms des **commodités sortantes** ;

- CSet_CN, pour filtrer sur le **nom d'une commodité** ;
- etc.

Remplir chacune de ces colonnes est facultatif mais c'est la combinaison qui permettra de filtrer process et commodités définissant un ensemble que l'on notera $\mathcal{P}$. On peut utiliser l'astérisque * comme joker pour remplacer n'importe quelle portion de nom (par exemple `*ARCHETYPE*` pour tous les archétypes de formes urbaines). Le paramètre `Year` filtre sur les années sur lesquelles appliquer la contrainte. Il est possible de mettre plusieurs années en les juxtaposant séparées par une virgule. De même que dans le contrainte présentée précédemment, il faut choisir le type de limite ajoutée (supérieure avec `UP`, inférieure avec `LO` et égale avec `FX`). La colonne `Attribute` spécifie l'attribut à contraindre ou plutôt la fonction à appliquer à chaque process/commodité sélectionné plus haut. Par exemple, si l'on cherche à contraindre l'activité d'un process, on mettra ici `ACT_BND`. Ainsi, pour chaque process $p \in \mathcal{P}$, c'est la variable $VAR_ACT(p)$ qui sera utilisée dans l'équation. Plusieurs colonnes peuvent ensuite être ajoutées pour pondérer la fonction choisie. Par exemple, dans le cas précédemment cité, on peut pondérer la somme en mettant ici un facteur f dans la colonne UC_ACT. On aura ainsi $f \times VAR_ACT(p)$. Les colonnes disponibles, d'après la documentation, sont les suivantes :

- UC_CAP
- UC_ACT
- UC_FLO
- UC_COMPRD
- UC_COMCON
- UC_NCAP

UC - All Regions/Periods

~UC_Sets: R_E: AllRegions

~UC_Sets: T_S:

UC_N	Pset_Set	Pset_PN	Attribute	Year	~UC_T Limit Type	UC_CAP	UC_ACT	UC_RHSRTS ~BDX01	UC_RHSRTS ~BDX02	UC_RHSRTS ~BDX03	UC_RHSRTS ~BDX04	UC_RHSRTS ~BDX05	UC
ForcerUtilisationSurfac		P_BUI_GND_ARCHETYPE_*	ACT_BND	2014	FX		1	2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	
		P_BUI_GND_ARCHETYPE_*	ACT_BND	2015	FX		1	2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	
		P_BUI_GND_ARCHETYPE_*	ACT_BND	2016	FX		1	2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	
		P_BUI_GND_ARCHETYPE_*	ACT_BND	2017	FX		1	2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	
		P_BUI_GND_ARCHETYPE_*	ACT_BND	2018	FX		1	2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	
		P_BUI_GND_ARCHETYPE_*	ACT_BND	2019	FX		1	2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	
		P_BUI_GND_ARCHETYPE_*	ACT_BND	2020	FX		1	2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	
		P_BUI_GND_ARCHETYPE_*	ACT_BND	2021	FX		1	2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	
		P_BUI_GND_ARCHETYPE_*	ACT_BND	2022	FX		1	2.494	4.981	10.098	6.819	4.760	

FIGURE H.3 – Exemple d'ajout d'une *contrainte utilisateur* (ou `UC`) sur l'activité d'un process.

En ajoutant des colonnes portant le nom d'une zone, il est aussi possible de pondérer avec des facteurs dépendant de la zone. Enfin, il faut définir le terme de droite de la contrainte (ou *Right hand side*). Jusque-là, les paramètres décrivaient la partie à gauche de l'inégalité et la façon dont cette partie était construite à partir des paramètres. Il faut ensuite déterminer la partie droite de l'équation à partir des colonnes *RHS*. Cette partie peut varier selon la zone en spécifiant plusieurs colonnes, par exemple en faisant `UC_RHS~BDX01`. Il existe différents noms de colonnes selon le type de contrainte choisie. En procédant de la sorte pour plusieurs process sur plusieurs lignes, il est donc possible de créer des équations variables (par exemple sur la proportion d'une certaine forme [2]). L'image H.3 illustre un cas simple forçant l'usage des archétypes.

2. Un cas classique dans la modélisation utilisant TIMES est d'utiliser ce mécanisme pour décrire la proportion d'une forme d'énergie – souvent renouvelable, parmi l'ensemble de l'énergie produite.

III. La définition de scénarios dans TIMES

Un scénario est défini par la sélection d'un ensemble de contraintes et de fichiers de description du système de référence parmi l'ensemble des fichiers existants. Par exemple, dans le cas où nous comparerions deux scénarios différents d'évolution de la population, nous aurons deux fichiers distincts définissant la tendance démographique jusqu'en 2050. Au moment de faire tourner les deux cas, l'un aurait *n* fichiers accompagnés du fichier de population lui correspondant tandis que l'autre aurait les mêmes *n* fichiers accompagnés de l'autre fichier démographique, d'où la production d'équations légérement différentes.

Annexe I

Formulation du problème d'optimisation de URBAN-SPATIALIZER

On note I l'ensemble des IRIS, A l'ensemble des archétypes d'occupation des sols et B l'ensemble des archétypes de bâtiments.

D'autres paramètres sont importants : la compatibilité des process entre eux est notée par la valeur $c(p, p')$ avec $(p, p') \in A \times A$[1], celle entre process et iris est notée par $k(p, i)$ avec $(p, i) \in A \times I$ ou $(p, i) \in B \times I$. Les aires totales des IRIS sont notées par t_i pour $i \in I$ tandis que la présence de process précédents dans les IRIS est stockée dans $a_a(i, p)$ et $a_b(i, p)$. Les caractéristiques des archétypes de formes urbaines, en termes de proportion de sol bâti et de sol autre, sont contenues dans $\rho_a^{b,\min}$, $\rho_a^{b,\max}$, $\rho_a^{o,\min}$ et $\rho_a^{o,\max}$ pour $a \in A$. On note enfin m^A et m^B les surfaces minimales de changement possible, qu'on a fixées arbitrairement à 1 m² pour les bâtiments et à 100 m² pour les formes urbaines.

Le modèle comprend plusieurs variables de décisions, pour $(i, p) \in I \times (A \cup B)$: $x_a(i, p)$ et $x_b(i, p)$ les choix d'*investissement* en archétypes de sol et de bâtiments, $r_a(i, p)$ et $r_b(i, p)$ les choix de *retrait* des archétypes de sol et de bâtiments, $y_r(i, p)$ la *production de sol bâtissable* par les archétypes de sol, $y_o(i, p)$ la *production de sol de type autre* par les archétypes de sol, $c_o(i, p)$ la *conversion* de sol de type autre en sol bâtissable et $w(i, p)$ la *modification ou non* des IRIS par les process de sol.

Des paramètres exogènes permettent de fixer les demandes auxquelles doit répondre le modèle. On note donc $\hat{x}_p^a$ (resp. $\hat{r}_p^a$) l'objectif total fixé par TIMES-URBAN d'investissement (resp. de retrait) pour les archétypes de sol, $\hat{x}_p^b$ (resp. $\hat{r}_p^b$) l'objectif total fixé par TIMES-URBAN d'investissement (resp. de retrait) pour les bâtiments. De plus, TIMES-URBAN fixe également la production de sol pour le bâti (resp. les autres surfaces), noté $\hat{y}_p^r$ (resp. $\hat{y}_p^o$) et le total de conversion réalisé dans la zone, noté $\hat{c}^o$.

La fonction objectif est définie de la façon suivante, en combinant les investisse-

1. Nous n'avons pas intégré de compatibilité entre bâtiments contrairement aux formes urbaines qui présentent de fait une facilité de conversion de l'une à l'autre plus ou moins grande.

ments et en retirant les retraits :

$$\begin{aligned} \min \Bigg[& \sum_{i\in I}\sum_{p\in A}\sum_{q\in A} x_a(i,p)c(p,q)a(i,q) \\ & + \sum_{i\in I}\sum_{p\in A} x_a(i,p)k(p,i) + \sum_{i\in I}\sum_{p\in B} x_b(i,p)k(p,i) \\ & - \sum_{i\in I}\sum_{p\in A} w(i,p) \\ & - \sum_{i\in I}\Big(\sum_{p\in A} r_a(i,p) + \sum_{p\in B} r_b(i,p)\Big) \Bigg] \end{aligned} \tag{I.1}$$

Le premier terme associe un coût au nouveaux investissements, le second et le troisième pénalisent les incompatibilités entre technologies, le quatrième minimise l'utilisation du switch et les cinquième et sixième termes minimisent les retraits.

I. Contraintes

De nombreuses contraintes, dites *structurelles*, permettent de s'assurer du bon fonctionnement du modèle (positivité des variables par exemple) tandis que d'autres, dites *stratégiques*, concernent les objectifs de la modélisation.

I.1. Contraintes structurelles

– Pas plus de retrait que de présence préalable

$$\forall (i,p) \in I \times B, r_b(i,p) \leq a_b(i,p)$$

– Pas plus de production de sol que possible dans la zone

$$\forall (i,p) \in I \times A, y_r(i,p) + y_o(i,p) \leq x_a(i,p) + a_a(i,p) - r_a(i,p)$$

$$\forall (i,p) \in I \times A, c_o(i,p) \leq y_o(i,p)$$

– Pas plus d'investissement que de retrait

$$\forall i \in I, \sum_{p\in A} x_a(i,p) = r_a(i,p)$$

– Pas plus de retrait que d'aire pré-existante

$$\forall (i,p) \in I \times A, r_a(i,p) \leq a_a(i,p)$$

– Mécanisme du switch

$$w(i,p) * t(i) \geq x_a(i,p)$$

$$w(i,p) * t(i) \geq r_a(i,p)$$

– Tailles minimales d'investissement et de retrait

$$x_a(i,p) \geq 1 \times 10^{-6} * w(i,p)$$

$$r_a(i,p) \geq 1 \times 10^{-6} * w(i,p)$$

– Respect des caractéristiques des process dans la production de sol pour bâti. On s'assure que le territoire utilisé pour le bâti soit entre le minimum et le maximum du paramètre correspondant de l'archétype :

$$(a_a(i,p)+x_a(i,p)-r_a(i,p))\rho_a^{b,\min} \leq y_r(i,p) \leq (a_a(i,p)+x_a(i,p)-r_a(i,p))\rho_a^{b,\max} \quad \text{(I.2)}$$

I.2. Contraintes stratégiques

Ces contraintes sont là pour vérifier que les variables de décision répondent aux demandes exogènes fixées.

– Les premières concernent les archétypes de sol :

$$\forall p \in A, \sum_{i \in I} x_a(i,p) = \hat{x}_p^a$$

$$\forall p \in A, \sum_{i \in I} r_a(i,p) = \hat{r}_p^a$$

$$\forall p \in A, \sum_{i \in I} y_r(i,p) = \hat{y}_p^r$$

$$\forall p \in A, \sum_{i \in I} y_o(i,p) = \hat{y}_p^o$$

$$\forall p \in A, \sum_{i \in I} c_o(i,p) = \hat{y}_p^o$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in A} c_o(i,p) = \hat{c}^o$$

– Les secondes concernent les bâtiments :

$$\forall p \in B, \sum_{i \in I} x_b(i,p) = \hat{x}_p^b$$

$$\forall p \in B, \sum_{i \in I} r_b(i,p) = \hat{r}_p^b$$

II. Procédure et changements

Ce modèle d'optimisation s'inscrit dans le programme suivant :

1. la situation initiale est stockée dans une forme de clone digital [2] ;
2. en boucle sur les années et sur les zones, l'algorithme d'optimisation tourne sur les données de la dernière année calculée et distribue le sol entre les archétypes ;
3. les décisions sont mises à jour dans le clone digital qui permet de nourrir le prochain algorithme.

Néanmoins, après l'intégration des résultats de TIMES-URBAN, nous nous sommes trouvés plusieurs fois face à des situations infaisables, c'est-à-dire qu'il n'*existait pas* de solution satisfaisant aux contraintes en place. Nous avons donc relaché la contrainte trop forte de respect strict des proportions des archétypes en l'intégrant à la fonction objectif, via deux variables de différences, notées δ_b^{pos} et δ_b^{neg} (resp. δ_o^{pos} et δ_o^{neg}) pour le terrain bâti (resp. pour les terrains autres), et qui correspondent à la distance positive ou négative à la valeur moyenne du paramètre. Cet artifice classique en optimisation de relaxation des contraintes permet plus de flexibilité puisque la contrainte n'est plus mais pénalise l'écart à l'intervalle normalement prévu, permettant de s'assurer que le paramètre reste, *autant que possible*, autour des valeurs demandées. Cela n'est pas absurde, d'un point de vue « *métier* », puisque les archétypes définis dans le chapitre précédent présentent une variabilité dans leurs paramètres plus grandes que celle résumée dans la variance et l'écart-type (par définition de ces derniers), ce qui explique peut-être l'infaisabilité rencontrée. L'équation I.1 devient donc l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
\min \Bigg[& \sum_{i\in I}\sum_{p\in A}\sum_{q\in A} x_a(i,p)c(p,q)a(i,q) \\
& + \sum_{i\in I}\sum_{p\in A} x_a(i,p)k(p,i) + \sum_{i\in I}\sum_{p\in B} x_b(i,p)k(p,i) \\
& - \sum_{i\in I}\sum_{p\in A} w(i,p) \\
& - \sum_{i\in I}\Big(\sum_{p\in A} r_a(i,p) + \sum_{p\in B} r_b(i,p)\Big) \\
& + \sum_{i\in I}\Big(\sum_{p\in A} \delta_b^{\text{pos}}(i,p) + \delta_b^{\text{neg}}(i,p) + \delta_o^{\text{pos}}(i,p) + \delta_o^{\text{neg}}(i,p)\ \Bigg]
\end{aligned} \tag{I.3}$$

On ajoute également la contrainte suivante, en remplacement de la contrainte I.2, qui définit les valeurs des différences pour le bâti (une contrainte similaire étant ajoutée pour la proportion de terrains autres produites par chaque archétype) :

2. Terme extrêmement à la mode qui consiste ici simplement à avoir construit un ensemble d'objets informatiques simulant l'organisation réelle de notre territoire : des zones contenant des IRIS eux-mêmes regroupant des zones occupées chacune par une forme distincte d'archétypes.

$$(a_a(i,p)+x_a(i,p)-r_a(i,p))\rho_a^{b,\text{moy}}+y_r(i,p)+\delta_b^{\text{pos}}(i,p)-\delta_b^{\text{neg}}(i,p)=0 \quad \text{(I.4)}$$

III. Perspectives

Parmi les pistes d'amélioration, il serait pertinent de procéder comme le fait le moteur de TIMES qui optimise le coût total actualisé du système au lieu d'étudier année par année. Les zones n'ayant *a priori* par d'interaction les unes avec les autres au sein de cette étape, il aurait suffi de répéter, comme ici, le même modèle pour chacune des zones.

RÉSUMÉ

Les villes sont au coeur de l'organisation de l'habitat humain et concentrent une part croissante de la population mondiale. Logiquement, elles doivent faire face aux enjeux environnementaux et sociaux que rencontre l'humanité. Elles sont ainsi victimes de la crise climatique et environnementale, subissant les conséquences de la pollution de l'air, des canicules, des inondations, des ouragans, et autres événements intenses. Mais elles sont aussi actrices de ces problématiques parce qu'elles rassemblent souvent les pouvoirs économiques, politiques et sociaux. En outre, la construction des milieux urbains se fait dans la durée, les bâtiments restant en place plusieurs décennies voire siècles et les formes urbaines créant une trame difficilement réversible. Dans ce contexte, il est primordial que les parties de villes que nous construisons aujourd'hui intègrent à la fois les aspects courts termes (financiers, esthétiques, d'adéquations aux besoins des propriétaires ou des commanditaires) mais aussi leurs impacts sur le long terme. Plusieurs visions de la ville telle qu'elle devrait tendre à être ont émergé depuis quelques décennies, de la ville technologique (ou "smart-city") à la ville durable en passant par une ville collective. Dans ce cadre, ce travail propose d'appliquer les principes de la modélisation prospectives aux problématiques d'aménagement urbain pour contribuer à la prise en considération des questions environnementales. Pour nourrir nos modèles, nous décrivons une méthodologie réplicable de création d'archétypes quantitatifs de formes urbaines et de bâtiments à partir de données publiques françaises. Cette approche, basée sur des techniques classiques (analyse en composantes principales et k-means), confirme quelques caractéristiques urbaines comme la difficile définition du périurbain. Notre modèle prospectif est constitué d'un modèle d'optimisation bottom-up basé sur le framework TIMES dont l'originalité réside dans la représentation du sol et de ses usages, d'un deuxième modèle de projection spatiale utilisant des cartes de contraintes et enfin d'un réseau de neurones à convolution servant à estimer les impacts relatifs sur la température des modifications urbaines calculées. Cette chaîne de modélisation est ensuite appliquée à quelques scénarios prospectifs sur la métropole de Bordeaux dont l'impact d'une politique de zéro artificialisation nette.

MOTS CLÉS

modélisation prospective, urbanisme, modèle TIMES, optimisation, analyse de données, réseaux de neurones, environnement, futur des villes

ABSTRACT

Cities are at the heart of the organization of the human habitat and concentrate a growing share of the world's population. Logically, they must face environmental and social challenges that humanity is experiencing. They are thus victims of the environmental crisis, suffering the consequences of air pollution, heat waves, floods, hurricanes, and other intense events. But they are also actors of these problems as they often bring together economic, political and social powers. In addition, the construction of urban systems is a long-term process, with buildings remaining in place for several decades or even centuries, and urban shapes drawing a grid not easily reversible. In this context, it is essential that parts of cities that we build today integrate both the short-term aspects (financial, aesthetic, adapting to the needs of owners or clients) and their long-term impacts. Several visions of future city, at least how it should tend to be, have emerged over the last few decades, from a technological city (or "smart city") to a sustainable city through a collective city. Within this framework, this work proposes to apply the principles of prospective modeling to urban planning issues in order to contribute to the consideration of environmental issues. To feed our models, we describe a replicable methodology for creating quantitative archetypes of urban shapes and buildings from French public data. This approach, based on classical techniques (principal component analysis and k-means), confirms some urban characteristics such as the difficult definition of the peri-urban area. Our prospective model then consists of a bottom-up optimization model based on the TIMES framework whose originality lies in the representation of the soil and its uses, a second spatial projection model using constraint maps and finally a convolutional neural network used to estimate the relative impacts on temperature of the calculated urban modifications. This modeling chain is then applied to a few prospective scenarios for the Bordeaux metropolitan area, including on the impact of a zero net artificialisation policy.

KEYWORDS

prospective modeling, urban planning, TIMES model, optimization, data analysis, neural networks, environment, future of cities