

THESE PRESENTEE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES CHIMIQUES
SPÉCIALITÉ: CHIMIE ANALYTIQUE ET ENVIRONNEMENT

Par Marc LOTTEAU

**Développement d'une approche d'intégration des questions de
morphologie urbaine dans l'évaluation environnementale des
projets d'aménagement à l'échelle du quartier basée sur l'analyse
de cycle de vie**

Sous la direction de: Guido SONNEMANN

Soutenue le 6 octobre 2017

Membres du jury :

M. TELLER Jacques	Professeur des Universités, Université de Liège	Rapporteur
Mme VENTURA Anne	Chargée de recherche, IFSTTAR	Rapporteur
M. GUIDO Sonnemann	Professeur des Universités, Université de Bordeaux	Directeur de thèse
Mme MUSY Marjorie	Directrice de Recherche, Cerema Ouest	Encadrante de thèse
M. BECKERS Benoît	Professeur des Universités, ISA-BTP (UPPA)	Examineur
M. BRUNEAU Denis	Professeur des ENSA, ENSAP-Bx	Président du jury
M. LOPEZ Jérôme	Responsable de pôle, NOBATEK/INEF4	Invité

Développement d'une approche d'intégration des questions de morphologie urbaine dans l'évaluation environnementale des projets d'aménagement à l'échelle du quartier basée sur l'analyse de cycle de vie

Résumé : Ce travail est une contribution à l'évaluation environnementale des projets d'aménagements en phase amont de conception. Il porte plus spécifiquement sur l'intégration des questions de morphologie urbaine à l'analyse de cycle de vie (ACV) appliquée à l'environnement bâti à l'échelle du quartier. La performance énergétique des bâtiments est en partie conditionnée par les choix de conception en termes d'aménagement, et notamment par la forme urbaine (géométrie et types de surfaces) et ses interactions avec le climat. L'objectif de cette thèse est de proposer aux équipes de conception d'opérations d'aménagement un moyen de prendre en compte l'influence de la forme urbaine sur les potentiels énergétiques du quartier avec perspective cycle de vie.

Une étude préalable a permis d'explicitier l'influence de la forme urbaine sur les potentiels énergétiques à l'échelle du quartier. Une approche de modélisation de l'énergie grise et de l'empreinte carbone des bâtiments est proposée, sur la base de laquelle une analyse de sensibilité à la forme urbaine et une analyse de contribution sont réalisées. Les résultats démontrent notamment l'influence primordiale de la forme des bâtiments ainsi qu'un lien très fort entre énergie grise et compacité du bâti. Une approche d'évaluation du potentiel de chauffage passif et du potentiel de confort d'été passif à l'échelle du quartier est également développée. Elle repose sur la réduction d'un quartier en quartier équivalent (réseau régulier de bâtiments parallélépipédiques), et sur l'application de métamodèles d'un moteur de simulation thermique. La méthode est testée et discutée sur un corpus de 45 cas d'étude. Ces développements méthodologiques ont vocation à être intégrés dans un outil existant d'ACV à l'échelle du quartier (NEST).

Mots clés : Analyse de Cycle de Vie (ACV), forme urbaine, échelle quartier, énergie grise, empreinte carbone, potentiels bioclimatiques

Integration of morphological analysis in early-stage LCA of the built environment at the neighborhood scale

Abstract : This work is a contribution to the environmental assessment of urban development projects in the upstream design phase. It focuses on integrating urban morphology issues with life cycle analysis (LCA) applied to the built environment at the neighborhood scale. The energy performance of buildings is partly determined by design choices relating to the urban form and its interactions with climate. The objective of this thesis is to provide to the design teams a way to take into account the influence of the urban form on the energy potentials of a neighborhood with a life cycle perspective.

A preliminary study was conducted on two neighborhoods to detail the influence of the urban form on their energy potentials. An approach to modeling the embodied energy and embodied carbon of buildings is proposed. A sensitivity analysis and a contribution analysis of this model are performed on two generic building shapes. The results demonstrate the key influence of the shape of the buildings and a very strong link between the embodied energy and the building's compactness. An approach to assessing the passive heating potential and passive summer comfort potential at the neighborhood scale is also developed. It is based on the transformation of a neighborhood in an equivalent urban form (regular array of block buildings), and on the application of metamodels of a thermal simulation engine. The method is tested and discussed on a corpus of 45 case studies. These methodological developments are intended to be integrated into an existing tool for neighborhood LCA (NEST).

Keywords : Life Cycle Assessment (LCA), urban form, neighborhood scale, embodied energy, embodied carbon, bioclimatic potentials

Environnement dans lequel la thèse a été préparée

L'institut d'accueil de la thèse a été l'Institut des Sciences Moléculaire (ISM) au sein du groupe Analyse du Cycle de Vie et Chimie Durable (CyVi).



Unité de recherche

Univ. Bordeaux, ISM, UMR, 33400 Talence, France
CNRS, ISM

Site : Université de Bordeaux ...
351 Cours de la Libération
33405 TALENCE Cedex

Ces travaux de thèse ont reçu un financement CIFRE de la part de l'ANRT et ont été réalisés au sein de NOBATEK/INEF4. Ils s'intègrent dans le projet précompétitif amont NEXT porté par NOBATEK/INEF4. NOBATEK est un centre de ressources technologiques qui développe ses activités de recherche appliquée et de prestations de service dans le secteur de la réhabilitation et la construction durables. INEF4 est un Institut pour la Transition Energétique qui a une activité collaborative mutualisée de recherche appliquée et d'innovation pour le secteur de la réhabilitation et de la construction durable. NOBATEK en est l'opérateur.

Institut pour la Transition Energétique



Site : NOBATEK/INEF4
67 rue de Mirambeau
64600 ANGLET, France

<http://www.nobatek.com/>

<http://www.inef4.com/fr/>

Remerciements

Un travail de thèse de doctorat est un projet particulier. Assez rapidement il occupe un espace singulier. Agissant tantôt comme une lentille déformante, tantôt comme un trou noir. Il semblerait qu'à un certain point tout ait un lien avec la thèse. Mais c'est précisément cette veille permanente qui permet de capter çà et là quelques idées aptes à vous sortir d'une impasse apparente. En cela, et malgré son caractère a priori solitaire, le travail de thèse, ne peut se concevoir que dans l'interaction, les rencontres, et les échanges.

La première rencontre a été avec NOBATEK/INEF4, et je tiens à remercier particulièrement Philippe Lagiere, Frédéric Betbeder et Emmanuel Dufrasnes de m'avoir confié ce sujet suite à nos premiers échanges dans divers cafés parisiens. Merci également à Grace Yopez-Salmon pour son accueil, son enthousiasme et sa confiance.

Puis est venu le temps de la rencontre avec mon encadrement de thèse. Je remercie chaleureusement mon directeur de thèse, Guido Sonnemann, et mes co-encadrantes Marjorie Musy et Catherine Semidor pour m'avoir accompagné durant ces trois années, ainsi que pour la confiance et la liberté qu'ils m'ont accordés dans le cadre de mes travaux de thèse. Un grand merci également à Philippe Loubet pour son aide toujours précieuse et sa très grande efficacité.

Je remercie chaleureusement Anne Ventura et Jacques Teller pour avoir accepté d'être mes rapporteurs, pour leur investissement dans l'évaluation de mon mémoire et leurs critiques constructives. Je remercie également les membres de mon jury de thèse, Denis Bruneau, Benoît Beckers et Jérôme Lopez.

Un grand merci également à l'ensemble de mes collègues qui de près ou de loin m'ont permis d'avancer dans mes travaux; Baptiste, Alexandre, Maxime P, Maxime B, Antoine, Stéphanie, Théo, ...

Trois ans de thèse c'est surtout trois ans de vie. Mon Amour, Marin ma Petite Mouette, Jasmin mon Câlin, vous êtes tout pour moi. Maman, Papa, merci pour tout encore une fois, c'est grâce à vous que je suis moi. Mes grands-parents, mon frère mes sœurs, vous êtes le paysage de mon cœur.

Table des matières

Index des figures	10
Index des tableaux.....	14
Glossaire	16
Chapitre 1. Introduction générale.....	18
1.1. CONTEXTE DE LA THESE	18
1.2. ENJEUX DE LA RECHERCHE	19
1.2.1. Le développement durable en urbanisme	19
1.2.2. Le quartier : échelle de travail décisive pour le développement urbain durable	20
1.2.3. Le besoin d'outils d'aide à la conception pour l'intégration du développement durable dans les opérations d'aménagement.....	21
1.2.4. L'analyse de cycle de vie : une méthode d'évaluation prometteuse pour les opérations d'aménagement	23
1.2.5. Le besoin de prise en compte de la forme urbaine et du microclimat dans l'ACV des projets d'aménagement en phase esquisse	24
1.3. PROBLEMATIQUE	26
1.4. HYPOTHESE, OBJECTIFS ET PLAN DE TRAVAIL.....	27
Chapitre 2. Revue critique sur l'application de l'Analyse de Cycle de Vie à l'évaluation de l'environnement bâti à l'échelle du quartier.....	30
2.1. INTRODUCTION	30
2.2. MATERIELS ET METHODES	32
2.2.1. Sélection du corpus de publications traitant de l'application de l'ACV à l'échelle du quartier....	32
2.2.2. Grille d'analyse des publications	32
2.2.2.1. Critères pour la phase 1 de l'ACV – définition de l'objectif et du périmètre d'étude	32
2.2.2.2. Critères pour la phase 2 de l'ACV - inventaire du cycle de vie.....	33
2.2.2.3. Critères pour les phases 3 et 4 de l'ACV - évaluation des impacts du cycle de vie et interprétation des résultats	34
2.3. RESULTATS.....	35
2.3.1. Phase 1: Définition de l'objectif et du périmètre d'étude	35
2.3.1.1. Objectifs des études	35
2.3.1.2. Périmètre d'étude et unité fonctionnelle	35
2.3.1.3. Frontières du système et phases du cycle de vie.....	37
2.3.2. Phase 2: Inventaire du cycle de vie (ICV).....	40
2.3.2.1. Données du système de premier plan	40
2.3.2.2. Données du système d'arrière-plan.....	41
2.3.3. Phase 3. Evaluation des impacts du cycle de vie (EICV)	42

2.3.3.1. Catégories d'impacts et de dommages	42
2.3.3.2. Etapes facultatives; normalisation, pondération	43
2.3.3.3. Résultats d'EICV	44
2.3.4. Phase 4 : Interprétation	47
2.3.4.1. Analyse de contribution	47
2.3.4.2. Analyse de sensibilité	48
2.4. DEFIS METHODOLOGIQUES ET BESOINS DE RECHERCHE	49
2.4.1. Multifonctionnalité du système et définition de l'unité fonctionnelle.....	49
2.4.2. Contextualisation	50
2.4.3. Les aspects temporels	51
2.5. PRINCIPAUX OUTILS EXISTANTS POUR L'ACV DE QUARTIERS.....	52
2.5.1. NovaEQUER	53
2.5.2. UMI.....	54
2.5.3. Sméo.....	55
2.5.4. SOLEN	57
2.5.5. NEST.....	58
2.6. CONCLUSIONS	62
Chapitre 3. Interactions forme urbaine, climat et énergie	64
3.1. INTRODUCTION	64
3.2. MODELISATION CLIMATIQUE URBAINE A L'ECHELLE DU QUARTIER	66
3.2.1. Bilan énergétique d'une surface urbaine	66
3.2.1.1. Bilan énergétique d'une maille surfacique d'un objet urbain.....	66
3.2.1.2. Bilan énergétique d'une surface urbaine	69
3.2.1.3. Cas particulier des parois végétales de bâtiments.....	69
3.2.2. La modélisation du bilan énergétique à l'échelle du quartier	71
3.2.2.1. Modèles thermo-radiatifs	71
3.2.2.2. Modèles climatiques	73
3.3. MODELISATION DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DES BATIMENTS EN MILIEU URBAIN	76
3.3.1. Simulation énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier.....	77
3.3.2. Approches de modélisation des interactions entre le bâtiment et son contexte urbain	78
3.4. APPROCHES MORPHOLOGIQUES DES POTENTIELS BIOLCLIMATIQUES A L'ECHELLE DU QUARTIER ...	83
3.4.1. Formes urbaines et problématiques environnementales.....	83
3.4.2. Indicateurs morphologiques et morpho-climatiques	84
3.4.2.1. Indicateurs morphologiques et climat urbain	87
3.4.2.2. Indicateurs morphologiques et bioclimatisme des bâtiments.....	93

3.4.3. Etudes des formes urbaines	97
3.4.3.1. Etudes des formes urbaines archétypales.....	97
3.4.3.2. Etudes de formes urbaines réelles	102
3.5. CONCLUSIONS	107
Chapitre 4. Développement et analyse d'un modèle simplifié pour l'évaluation de l'énergie grise et de l'empreinte carbone des bâtiments.....	109
4.1. INTRODUCTION	109
4.2. MATERIELS ET METHODES	112
4.2.1. Modélisation de l'énergie grise et de l'empreinte carbone des bâtiments	112
4.2.2. Méthodes d'analyse de sensibilité et d'analyse de contribution.....	115
4.2.2.1. Mise en œuvre du modèle	115
4.2.2.2. Méthode d'analyse de sensibilité.....	116
4.2.2.3. Méthode d'analyse de contribution.....	118
4.3. RESULTATS ET DISCUSSION	119
4.3.1. Identification des paramètres influents et analyse du comportement du modèle	119
4.3.2. Classement des paramètres d'entrée en fonction de leur degré d'influence	123
4.3.3. Analyse de contribution	126
4.4. CONCLUSIONS	131
Chapitre 5. Analyse détaillée de l'influence de la morphologie urbaine sur les potentiels bioclimatiques d'un quartier	133
5.1. INTRODUCTION	133
5.2. CAS D'ETUDE ET CAMPAGNE DE SIMULATION	134
5.2.1. Présentation des cas d'étude	134
5.2.1.1. Rénovation urbaine de type grand ensemble - ZAC Armstrong, Vénissieux.....	134
5.2.1.2. Développement neuf type écoquartier dense - ZAC de la Berge du Lac/GINKO, Bordeaux	135
5.2.2. Campagne de simulation.....	138
5.2.2.1. Présentation des scénarios.....	138
5.2.2.2. Simulation thermo-radiative avec le logiciel SOLENE	140
5.2.2.3. Hypothèses de simulation	141
5.2.2.4. Limites des simulations	144
5.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	145
5.3.1. Ordres de grandeur des différents termes du bilan énergétique de surface	145
5.3.1.1. Flux CLO	145
5.3.1.2. Bilan GLO	146
5.3.1.3. Bilan énergétique de surface.....	148
5.3.1.4. Synthèse des résultats.....	151

5.3.2. Effets de la forme urbaine et des types du surface sur le bilan énergétique	152
5.3.2.1. Effets du contexte urbain sur le bilan énergétique de surface	152
5.3.2.2. Effets de l'albédo sur le bilan énergétique de surface	156
5.3.2.3. Effets de la géométrie urbaine sur le bilan énergétique de surface	158
5.3.2.4. Effet de la végétation sur le bilan énergétique de surface	160
5.3.3. Effets sur les potentiels bioclimatiques à l'échelle du quartier	162
5.4. CONCLUSIONS	171
Chapitre 6. Modélisation du potentiel de chauffage passif et du potentiel de confort d'été passif à l'échelle du quartier.....	173
6.1. INTRODUCTION	173
6.2. DEFINITION D'UN QUARTIER GENERIQUE EQUIVALENT DU POINT DE VUE DES BESOINS THERMIQUES	173
6.3. CONSTRUCTION DE METAMODELES POUR L'EVALUATION DES BESOINS DE CHAUD ET DE FROID D'UN QUARTIER GENERIQUE DE TYPE « BLOC »	177
6.3.1. L'utilisation de métamodèles pour l'évaluation des besoins énergétiques des bâtiments.....	177
6.3.2. Les métamodèles par polynômes du chaos	180
6.3.3. Le modèle de référence EnergyPlus à approximer	182
6.3.4. Démarche adoptée pour la génération des métamodèles	185
6.3.5. Construction des métamodèles	188
6.4. TEST ET DISCUSSION DE LA METHODE.....	190
6.4.1. Méthode de test.....	190
6.4.2. Corpus de cas d'étude	191
6.4.3. Résultats	193
6.4.3.1. Analyse sur les besoins de chaud	196
6.4.3.2. Analyse sur les besoins de froid	200
6.4.3.3. Classement multicritère de notre corpus de cas d'étude	203
6.5. CONCLUSION	205
Chapitre 7. Discussion générale et conclusion	207
7.1. DISCUSSION GENERALE	207
7.1.1. Discussion des résultats	207
7.1.1.1. L'application de l'ACV en phase amont de conception de projets d'aménagement	207
7.1.1.2. L'influence des leviers de conception de l'urbaniste sur les potentiels énergétiques du quartier.....	208
7.1.1.3. Développement d'un modèle d'évaluation de l'énergie grise des bâtiments à l'échelle du quartier.....	210
7.1.1.4. Développement d'un modèle d'évaluation des besoins thermiques des bâtiments à l'échelle du quartier.....	211

7.1.2. Intégration des travaux dans NEST	213
7.1.2.1. Evaluation de l'énergie et des émissions grises de GES des matériaux de construction	214
7.1.2.2. Evaluation des potentiels de chauffage passif et de confort d'été passif.....	216
7.2. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	217
REFERENCES	221
ANNEXES.....	231
Annexe 1. Sources des données du système de premier-plan	231
Annexe 2. Sources de données du système d'arrière-plan.....	232
Annexe 3. Influence de la prise en compte des fondations et des niveaux de parking souterrain	233
Annexe 4. Influence du choix des coefficients d'échange convectifs	235
Annexe 5. Détermination de la durée d'initialisation des simulations	240

Index des figures

Figure 1 - Structure de la thèse	29
Figure 2 - Représentation du système Quartier dans le cadre de l'ACV	33
Figure 3 - Etapes du cycle de vie du quartier et contributeurs associés à la fois à l'échelle du bâtiment et à l'échelle du quartier	38
Figure 4 - Consommation d'énergie primaire (CEP) et changement climatique (CC); min, Q1, médiane, Q3, et max.....	46
Figure 5 – Intégration de NovaEQUER dans la suite logicielle IZUBA-Energies	53
Figure 6 - Les trois termes du rayonnement solaire; flux solaire direct, flux solaire diffus et inter-réflexions solaires (Bouyer et al. 2010).....	67
Figure 7 - Les deux termes du bilan GLO; les flux GLO échangés avec le ciel et avec la scène urbaine (Bouyer et al. 2010).....	68
Figure 8 - Exemple de résultats obtenus avec SOLENE-microclimat (Robitu 2005) (flux solaire, température de surface, vitesse du vent)	74
Figure 9 – Exemple de résultats obtenus avec “Coupled-Simulation” (Chen et al. 2009) (vitesse du vent, température d'air).....	74
Figure 10 – Principe de la simulation couplée par (Bouyer 2009) qui utilisait alors Fluent pour la simulation aéraulique.....	74
Figure 11- Schéma de couplage entre ENVI-met et EnergyPlus (Yang et al. 2012)	80
Figure 12 - Besoins annuels de froid pour différentes approches de prise en compte de l'environnement urbain, et pour plusieurs configurations de rue canyon (Dorer et al. 2013)	82
Figure 13 - Facteurs affectant les consommations d'énergie des bâtiments (Baker & Steemers 2000)	84
Figure 14 - Trois tissus urbains présentant le même coefficient d'occupation des sols mais des formes urbaines très différentes (Berghauser Pont & Haupt 2007)	85
Figure 15 – Diagramme Spacemate, représentation multivariable de la densité urbaine (Berghauser Pont & Haupt 2005)	86
Figure 16 - Indicateurs morphologiques caractéristiques de la performance énergétique et du microclimat urbain (Adolphe 2009)	89
Figure 17 – Les 17 types de LCZ (10 types urbanisés et 7 types non-urbanisés) (Stewart 2011)	91
Figure 18 - Structure d'un type de LCZ (Stewart 2011)	92
Figure 19 – Indicateurs sélectionnés par Nault et al. (2015) dans le cadre de l'analyse des indicateurs de potentiel solaire des bâtiments à l'échelle du quartier	95
Figure 20 - Deux formes urbaines archétypales extrêmes, basées sur des pavillons (à gauche) et sur des cours (à droite), et présentant les mêmes CES, COS, et hauteurs des bâtiments (Martin & March 1972)	98
Figure 21 – Proposition radicale pour le remplacement du centre de Manhattan par des bâtiments à large cours (Martin & March 1972).....	98
Figure 22 - Formes urbaines archétypales proposés par (Martin & March 1972) . De gauche à droite; blocs (pavillons), barres (slabs), maisons en bande (terraces), maisons en bande à cours (terrace-courts), îlots à cours (pavillon-courts) et tissus continu de maisons à cours (courts)	99
Figure 23 - Facteurs de Vue du Ciel au de six formes urbaines génériques (Ratti et al. 2003).....	100
Figure 24 - Vue axonométrique (67,5m x 67,5m) d'un tissu traditionnel arabe (cours), et de deux structures basées sur des pavillons (3 étages au centre et 6 étages à droite) (Ratti et al. 2003)	101
Figure 25 - Ville Radieuse - Gratte-ciel (gauche), Redents (centre) et Alvéoles (droite)	102
Figure 26 – Hauteur des bâtiments et besoins de chauffage (EIFER & LSE Cities 2011).....	105
Figure 27 – Types morphologiques de la ville de Maceió (Martins et al. 2013)	106
Figure 28 – Paramètres urbains décisifs pour l'évaluation des besoins de chaud, de froid et d'éclairage (Rodríguez-Álvarez 2016)	107

Figure 29 - Les phases du cycle de vie d'un bâtiment ; la zone grisée correspond aux phases couvertes par le modèle.....	112
Figure 30 - Décomposition d'un bâtiment résidentiel collectif en éléments fonctionnels.....	113
Figure 31 - Formes générique de bâtiments utilisées pour l'analyse de sensibilité et l'analyse de contribution ; Bloc (à gauche) et Cour (à droite)	115
Figure 32 - Résultats de l'analyse de Morris pour la géométrie de type « Bloc » et pour les domaines de variation étendus des paramètres d'entrée ; Energie Grise (gauche) et Empreinte Carbone (droite). Pour chaque paramètre j, μ_j^* est la moyenne de la valeur absolue des effets élémentaires et σ_j est l'écart type des effets élémentaires.....	120
Figure 33 - Résultats de l'analyse de Morris pour la géométrie de type « Bloc » et pour les domaines de variation réduits des paramètres d'entrée ; Energie Grise (gauche) et Empreinte Carbone (droite). Pour chaque paramètre j, μ_j^* est la moyenne de la valeur absolue des effets élémentaires et σ_j est l'écart type des effets élémentaires.....	120
Figure 34 - Résultats de l'analyse de Morris pour la géométrie de type « Cour » et pour les domaines de variation étendus des paramètres d'entrée ; Energie Grise (gauche) et Empreinte Carbone (droite). Pour chaque paramètre j, μ_j^* est la moyenne de la valeur absolue des effets élémentaires et σ_j est l'écart type des effets élémentaires.....	121
Figure 35 - Résultats de l'analyse de Morris pour la géométrie de type « Cour » et pour les domaines de variation réduits des paramètres d'entrée ; Energie Grise (gauche) et Empreinte Carbone (droite). Pour chaque paramètre j, μ_j^* est la moyenne de la valeur absolue des effets élémentaires et σ_j est l'écart type des effets élémentaires.....	121
Figure 36 – Indice de Sobol totaux pour la géométrie « Bloc » (domaines de variations étendus)	125
Figure 37 - Indice de Sobol totaux pour la géométrie « Cour » (domaines de variations étendus	125
Figure 38 – Analyse de contribution des éléments fonctionnels pour l'énergie grise – géométrie « Bloc »	127
Figure 39 - Analyse de contribution des éléments fonctionnels pour l'empreinte carbone – géométrie « Bloc »	127
Figure 40 - Analyse de contribution des éléments fonctionnels pour l'énergie grise – géométrie « Cour »	128
Figure 41 - Analyse de contribution des éléments fonctionnels pour l'empreinte carbone – géométrie « Cour »	128
Figure 42 – Géométrie « Bloc » ; régression linéaire de l'énergie grise par rapport à la compacité.....	129
Figure 43 - Géométrie « Bloc » ; régression linéaire de l'empreinte carbone par rapport à la compacité	130
Figure 44 - Géométrie « Cour » ; régression linéaire de l'énergie grise par rapport à la compacité.....	130
Figure 45 - Géométrie « Cour » ; régression linéaire de l'empreinte carbone par rapport à la compacité	130
Figure 46 - Opération de renouvellement urbain du plateau des Minguettes, Vénissieux.....	134
Figure 47 - Quartier Armstrong état initial (gauche) et après démolitions (droite)	135
Figure 48 - Projet d'aménagement de la ZAC Armstrong.....	135
Figure 49 - Plan masse du projet Ginko, Bordeaux	137
Figure 50 - Projet immobilier développé sur l'îlot A2.2 par Mésolia (Entreprise Sociale pour l'Habitat).	138
Figure 51 – Entrées et Sorties du logiciel de simulation thermo-radiative SOLENE-microclimat.....	140
Figure 52 - Cas d'étude Armstrong - O0_Et0 (gauche) et Ginko - O0_Et0 (droite)	145
Figure 53 - Flux CLO pour le quartier Armstrong, scénario MIA_O0_Et0	145
Figure 54 - Flux CLO pour le quartier Ginko, scénario MIA_O0_Et0	146
Figure 55 – Flux GLO pour le quartier Armstrong, scénario MIA_O0_ET0	147

Figure 56 - Flux GLO pour le quartier Ginko, scénario MIA_OO_Et0.....	147
Figure 57 – Bilan énergétique de surface, Armstrong, scénario MIA_OO_Et0, solstice d’hiver (gauche) et d’été (droite)	148
Figure 58 - Bilan énergétique par types de surfaces urbaines (cumul journalier) pour les scénarios GK_HVR_MIA_OO_Et0.....	150
Figure 59 - Cas d'étude Armstrong (OO_Et0) et parallépipède équivalent	152
Figure 60 - Flux CLO par types de surfaces urbaines (cumul journalier) pour le scénario ARM_MIA_OO_Et et parallépipède équivalent, hiver (gauche) et été (droite).....	153
Figure 61 – Flux GLO par types de surfaces urbaines (cumul journalier) pour le scénario ARM_MIA_OO_Et et parallépipède équivalent, hiver (gauche) et été (droite).....	153
Figure 62 – Bilan énergétique par types de surfaces urbaines (cumul journalier) pour le scénario ARM_MIA_OO_Et et parallépipède équivalent, hiver (gauche) et été (droite)	154
Figure 63 – Effet de l’albédo sur le bilan de surfaces sur les façades et les toits au solstice d’hiver (gauche) et au solstice d’été (droite)	157
Figure 64 - Effet de la hauteur des bâtiments sur le bilan énergétique des façades.....	159
Figure 65 - Effet de l’orientation de la scène urbaine sur le bilan énergétique des façades.....	160
Figure 66 –Approche de modélisation des besoins thermiques des bâtiments à l’échelle du quartier...	173
Figure 67 – Géométrie du modèle de référence.....	183
Figure 68 - Zones géographiques de la Réglementation Thermique RT2012	185
Figure 69 - Etapes de la démarche adoptée pour la génération des métamodèles	186
Figure 70 - Evolution de l’erreur RMSE et de l’ordre du métamodèle des besoins de chaud selon la taille de l’échantillon	188
Figure 71 – Evolution de l’erreur MAX et de l’ordre du métamodèle des besoins de chaud selon la taille de l’échantillon	188
Figure 72 - Evolution de l’erreur RMSE et de l’ordre du métamodèle des besoins de chaud selon la taille de l’échantillon.....	189
Figure 73 - Evolution de l’erreur MAX et de l’ordre du métamodèle des besoins de chaud selon la taille de l’échantillon.....	189
Figure 74 – Les trois types d’évaluation menées dans la cadre du test de l’approche de modélisation des besoins thermiques.....	190
Figure 75 - Corpus de cas d’étude; quartiers réels.....	191
Figure 76 - Corpus de cas d’étude; 6 formes génériques dérivées de (Martin & March 1972)	192
Figure 77 – Formes urbaines archétypales proposées par (Martin & March 1972)	193
Figure 78 - Cartographie Spacemate (Berghauser Pont & Haupt 2005) du corpus de cas d’étude	193
Figure 79 - Nombre de comparaisons significatives pour le corpus de cas d’étude complet.....	198
Figure 80 – Nombre de comparaisons significatives pour le corpus de cas d’étude réduit	200
Figure 81 - Nombre de comparaisons significatives sur les besoins de froid pour le corpus de cas d’étude complet.....	202
Figure 82 – Nombre de comparaisons significatives sur les besoins de froid pour le corpus de cas d’étude réduit	203
Figure 83 - Diagramme radar, évaluation multicritère du corpus de cas d’étude	204
Figure 84 - Synthèse des apports méthodologiques pour l'évaluation environnementale de quartiers prenant en compte leur forme.....	213
Figure 85 - Evolution horaire de des températures de surface au solstice d'hiver pour différents paramétrages du coefficient d'échange convectif	238
Figure 86 – Cumul journalier des flux GLO, convectif et conductif au solstice d'hiver pour différents paramétrages du coefficient d'échange convectif	238

Figure 87 - Evolution horaire de des températures de surface au solstice d'été pour différents paramétrages du coefficient d'échange convectif	239
Figure 88 - Cumul journalier des flux GLO, convectif et conductif au solstice d'été pour différents paramétrages du coefficient d'échange convectif	239
Figure 89 - Comparaison entre sim0 et sim1 pour le scénario AR%_HVR_MLA_OO_Et0	242

Index des tableaux

Tableau 1 - Critère d'analyse des études de cas	35
Tableau 2 - Eléments clés de l'analyse des cas d'étude	37
Tableau 3 - Composants du quartier et contributeurs associés pour les différents champs de l'environnement bâti.....	39
Tableau 4 - Résultats d'EICV, consommation d'énergie primaire (CEP) et changement climatique (CC)...	45
Tableau 5 – Indicateurs évalués par NovaEQUER	54
Tableau 6 – indicateurs évalués par UMI	55
Tableau 7 - Liste des domaines traités par SméO pour chacune des étapes d'un projet de quartier (seules les 3 premières colonnes sont étudiées).....	56
Tableau 8 -Indicateurs environnementaux évalués par Sméo.....	57
Tableau 9 - Indicateurs évalués par SOLEN	58
Tableau 10 – Indicateurs évalués par NEST.....	59
Tableau 11 – Caractéristiques principales des outils	61
Tableau 12 - Besoins de chauffage de 5 types parisiens (Salat 2011).....	103
Tableau 13 - Composition des éléments fonctionnels du bâtiment résidentiel collectif et facteurs de caractérisation associés.....	114
Tableau 14 - Les deux jeux de paramètres d'entrée ; les paramètres de forme (haut) et les paramètres d'éléments fonctionnels (bas).....	116
Tableau 15 - Domaines de variation des paramètres d'entrée.....	118
Tableau 16 – Classement des paramètres influents (X) et non-influents (-) selon l'analyse de Morris ...	122
Tableau 17 – Analyse statistique des échantillons de configurations de bâtiments de type « Bloc » et « Cour »	124
Tableau 18 - Albédos des différentes surfaces	139
Tableau 19 - Récapitulatif des scénarios simulés pour chaque cas d'étude et pour chaque solstice.....	140
Tableau 20 - Composition et propriétés des surfaces minérales.....	142
Tableau 21 - Composition et propriétés des surfaces végétales	142
Tableau 22 –Propriétés du couvert végétal	142
Tableau 23 - Propriétés thermiques des matériaux utilisés dans nos modélisations.....	142
Tableau 24 - Comportements généraux des différents types de surfaces d'enveloppe des bâtiments (scénario MIA_OO_Et0)	152
Tableau 25 - Comparaison des apports solaires transmis et déperditions/aperditions thermiques pour le cas Armstrong (ARM) et pour le parallélépipède équivalent (ARM-P-E)	155
Tableau 26 - Influence de l'albédo sur les flux CLO en moyenne sur la scène urbaine	156
Tableau 27 - Influence de l'albédo sur les flux CLO en moyenne sur les façades.....	156
Tableau 28 – Différences maximales des températures de surface entre les scénarios MLA_OO_Et0 et MHA_OO_Et0.....	157
Tableau 29 - Influence de la hauteur des bâtiments sur les flux CLO en moyenne sur les façades	159
Tableau 30 - Variation des flux CLO (cumul journalier en moyenne sur les façades) avec l'orientation..	159
Tableau 31 - Armstrong – Différences maximales de températures de surface entre le scénario MIA et les scénarios végétaux.....	161
Tableau 32 –Armstrong - Effet des différents scénarios de végétalisation sur le bilan énergétique des façades	162
Tableau 33 – Armstrong - Effet des différents scénarios de végétalisation sur le bilan énergétique des toits.....	162
Tableau 34 - Potentiels bioclimatiques et indicateurs associés.....	165

Tableau 35 – Scénarios considérés pour évaluer les effets des différents paramètres de conception sur les potentiels bioclimatiques.....	165
Tableau 36 - Effet des paramètres de conception sur les potentiels bioclimatiques à l'échelle du quartier	167
Tableau 37 - Synthèse effet des paramètres de conception sur les potentiels bioclimatiques	168
Tableau 38 – Comparaison des potentiels bioclimatiques pour Armstrong et Ginko (scénario MIA).....	169
Tableau 39 – Comparaison des potentiels bioclimatiques pour les scénarios ARM_MIA_OO_Et0 et GK_MIA_OO_Et0.....	169
Tableau 40 - Effet des paramètres de conception sur les apports solaires des façades les plus ensoleillées et les déperditions thermiques des façades les moins ensoleillées	170
Tableau 41 - Apports solaires sur les façades les plus ensoleillées et déperditions thermiques des façades les moins ensoleillées pour les cas d'études Armstrong et Ginko, scénario MIA_OO_Et0	171
Tableau 42 - paramètres urbains clés, dont la conservation entre la forme urbaine originale et son quartier générique équivalent assure l'équivalence des besoins thermiques et lumineux (Rodríguez-Álvarez 2016).....	174
Tableau 43 - Les étapes de la méthode de calcul des paramètres du quartier générique équivalent.....	176
Tableau 44 - Distribution de probabilité des variables et famille de polynômes orthogonaux associés (Xiu & Karniadakis 2002)	181
Tableau 45 - Hypothèses de simulation thermique dynamique pour le modèle de référence.....	184
Tableau 46 – Paramètres, domaines de variation et lois de probabilité	186
Tableau 47 – Statistiques des erreurs relatives des métamodèles pour les besoins de chaud et de froid	190
Tableau 48 – Résultats d'évaluation des besoins de chaud pour du corpus de cas d'étude et erreurs associées à chaque étape.....	195
Tableau 49 - Résultats d'évaluation des besoins de froid pour du corpus de cas d'étude et erreurs associées à chaque étape.....	196
Tableau 50 - Classement des cas d'étude pour l'ensemble des quatre critères (même poids accordé à chaque critère)	205
Tableau 51 – Valeurs forfaitaires des lots simplifiés issues de la méthode d'évaluation E+C-.....	215
Tableau 52 – Stratégie de couverture des lots de matériaux et systèmes proposée pour la nouvelle méthode d'évaluation de l'énergie et des émissions grise dans NEST (vert : couverture complète, orange : couverture partielle).	216
Tableau 53 – Caractéristiques du bâtiment de référence.....	233
Tableau 54- Contribution des fondations and des parkings souterrains à l'énergie grise et à l'empreinte carbone.....	233
Tableau 55 - Stratégies de paramétrage du coefficient d'échange convectif.....	235
Tableau 56 - Moyennes et écart-types des flux conductifs pour les quatre paramétrages du coefficient d'échange convectif.....	236
Tableau 57 - Influence de la durée d'initialisation des simulations sur le cas ARM_HVR_MLA_OO_Et0 pour le 21 décembre.....	242
Tableau 58 - Influence de la durée d'initialisation des simulations sur le cas ARM_HVR_MLA_OO_Et0 pour le 20 décembre.....	242
Tableau 59 - Influence de la durée d'initialisation des simulations sur le cas ARM_HVR_MLA_OO_Et0 pour le 19 décembre.....	243
Tableau 60 - Influence de la durée d'initialisation des simulations sur le cas ARM_ETE_MLA_OO_Et0 pour le 20 juin	243

Glossaire

ACV	Analyse de cycle de vie
AS	Analyse de sensibilité
CES	Coefficient d'emprise au sol
CFD	<i>Computational fluid dynamics</i>
CLO	Courte longueur d'onde
COS	Coefficient d'occupation des sols
δQ_A	Flux advectif
δQ_S	Flux stocké
EC	Empreinte carbone
EG	Energie grise
EICV	Evaluation des impacts du cycle de vie
EnR	Energies renouvelables
FEG	Facteur d'énergie grise
FGES	Facteur d'émissions grises de GES
FLJ	Facteur de lumière du jour
FVC	Facteur de vue du ciel
GES	Gaz à effet de serre
GLO	Grande longueur d'onde
h_c	Coefficient d'échange convectif
HR	Humidité relative
ICU	Îlot de chaleur urbain
ICV	Inventaire de cycle de vie
MAX	Erreur maximum
ORU	Opération de renouvellement urbain
PLU	Plan local d'urbanisme
Q_C	Flux conductif
Q_F	Flux anthropogénique
Q_H	Flux convectif
Q_L	Flux latent
Q_R	Flux radiatif net
Qs	Humidité spécifique
$R_{CLO,abs}$	Flux solaire absorbé
$R_{CLO,dif}$	Flux solaire diffus
$R_{CLO,dir}$	Flux solaire direct
$R_{CLO,g}$	Flux solaire global incident
$R_{CLO,inter}$	Flux solaire en provenance des inter-réflexions
$R_{GLO,ciel}$	Flux GLO échangé avec le ciel
$R_{GLO,tot}$	Flux GLO total
$R_{GLO,urb}$	Flux GLO échangé avec la scène urbaine
RMSE	Erreur quadratique moyenne

SCoT	Schéma de cohérence territoriale
SIG	Système d'information géographique
STD	Simulation thermique dynamique
Tair	Température de l'air
Tse	Température de surface extérieure
UF	Unité Fonctionnelle
ZAC	Zone d'aménagement concerté

Chapitre 1. Introduction générale

1.1. CONTEXTE DE LA THESE

Dans le contexte général du développement durable et plus particulièrement de son application au domaine de l'aménagement, nos travaux de recherche portent sur le développement d'indicateurs d'évaluation environnementale de projets d'aménagement à l'échelle du quartier. Pour ce faire, nous travaillons à l'application de l'Analyse de Cycle de Vie à l'évaluation des opérations d'aménagement.

Cette thèse est intégrée au projet de recherche « NEXT » portée par l'Institut pour la Transition Énergétique (ITE) NOBATEK/INEF4. Ce projet porte sur le développement d'une plateforme d'innovation ouverte rassemblant des applications expertes dans un objectif d'évaluation des opérations d'aménagement ou de rénovation urbaine.

Dans le cadre de ce projet, la thèse est effectuée en partenariat entre NOBATEK/INEF4, le groupe de recherche CyVi de l'ISM (Université de Bordeaux) spécialisé dans l'analyse de cycle de vie (ACV), le laboratoire CRENAU (ENSA Nantes) spécialisé dans la micro-climatologie urbaine, et le laboratoire GRECAU de l'ENSAPBx spécialisé dans les ambiances architecturales et urbaines.

Notre recherche vise à répondre à un besoin d'outils d'aide à la conception des opérations d'aménagement en phase esquisse et constitue un prolongement des travaux de thèse de Yopez-Salmon (Yopez-Salmon 2011). Cette première thèse effectuée en partenariat entre le laboratoire GRECAU (ENSAPBx) et NOBATEK/INEF4 a abouti au développement de l'outil NEST (*Neighborhood Evaluation for Sustainable Territories*), qui propose une évaluation de la performance environnementale des projets d'aménagement basée sur l'ACV. Cet outil dont une première version stabilisée existe, est actuellement l'objet de nouveaux développements dans le cadre du projet « NEXT ». Parmi ces développements deux axes forts se dégagent pour l'enrichissement de l'outil ; i. l'extension du domaine d'application de l'outil à des opérations de rénovation urbaines (et plus seulement à des développements urbains de type écoquartier), et ii. l'intégration des thématiques de la morphologie urbaine (formes urbaines et types de surfaces urbaines) et du bioclimatisme (interaction du projet d'aménagement avec les sollicitations climatiques locales).

Ce second axe fait l'objet de notre recherche, dans laquelle nous proposons d'explorer les possibilités d'enrichissement de l'ACV des projets d'aménagement, avec les apports de l'analyse morpho-climatique. Cet enrichissement de l'ACV par le traitement des interactions entre le projet et les conditions climatiques locales doit nous permettre de proposer des éléments nouveaux d'aide à la conception, et ce notamment sur un ensemble de thématiques contribuant à l'amélioration de la performance énergétique du tissu urbain à l'échelle du quartier.

In fine, notre recherche, qui devra être intégrée à l'outil NEST et mise à disposition dans la plateforme qui naîtra du projet « NEXT », a pour objectif de proposer aux équipes de conception d'opérations d'aménagement des moyens de prendre en compte les interactions entre la morphologie urbaine et le climat dès l'esquisse avec pour objectif la performance environnementale, et notamment énergétique, sur l'ensemble du cycle de vie du projet.

1.2. ENJEUX DE LA RECHERCHE

1.2.1. Le développement durable en urbanisme

Le concept de développement durable se développe depuis les années 1970, en réponse à la prise de conscience de la vulnérabilité de notre environnement naturel au regard de nos modèles de développement. Cette prise de conscience a notamment été initiée par la publication du rapport du club de Rome (Meadows et al. 1972). Ce rapport est un texte majeur, qui a marqué l'apparition des préoccupations environnementales en alertant sur la finitude des ressources naturelles dans un contexte de croissance démographique. Aujourd'hui, face aux urgences climatiques, écologiques, économiques, sociétales et sociales, le concept de développement durable s'est imposé en nouveau paradigme.

C'est le rapport Brundtland (World Commission on Environment and Development 1987) qui a fixé la définition de base du développement durable, à savoir « un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs et correspond au devoir des générations actuelles de transmettre un monde vivable, viable et reproductible ». Cette définition particulièrement riche est souvent traduite en un objectif de recherche d'un équilibre cohérent et viable à long terme entre les trois « piliers » du développement durable, que sont les enjeux environnementaux, sociaux et économiques associés aux activités humaines. Cette approche des trois « piliers » souligne que le développement durable, même s'il est souvent présenté comme un paradigme environnemental ne se réduit pas à la seule prise en compte des impacts environnementaux liés aux activités humaines. Aujourd'hui, la gouvernance, comprise généralement comme démocratisation des processus de choix, est souvent présentée comme le quatrième pilier du développement durable.

L'urbanisation est un phénomène dont l'évolution accélérée touche à présent la planète entière. Selon les Nations Unies, 66% de la population mondiale vivra en zone urbaine en 2050 (UN 2014). Or, les villes exercent des pressions très importantes sur l'environnement. L'environnement bâti (secteurs du bâtiment et des transports), est un contributeur majeur en termes d'utilisation des ressources naturelles et d'impacts environnementaux. Il représente par exemple 62% de la consommation d'énergie finale globale (2009) (IEA 2011) et 55% des émissions de gaz à effet de serre (2004) (Metz et al. 2007). Dans les pays industrialisés, les bâtiments représentent 42% de la consommation énergétique finale, 35% des émissions de gaz à effet de serre et sont responsables de plus de 50% de tous les matériaux extraits (European Commission 2011). Naturellement la fabrique de la ville se retrouve au cœur de la montée en puissance des questions de durabilité. Aujourd'hui, en France, les objectifs du développement durable tels que définis par la loi Grenelle 2 (LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement) sont devenus des sujets incontournables pour tous ceux qui réfléchissent et interviennent sur la ville ; la lutte contre le changement climatique, la préservation de la biodiversité, des milieux et des ressources, la cohésion sociale et la solidarité entre les territoires et les générations, l'épanouissement de tous les êtres humains ou encore une dynamique de développement économique suivant des modes de production et de consommation responsables.

Depuis une dizaine d'années, cette nouvelle conception de l'urbanisme durable s'est traduite notamment par l'évolution du cadre législatif et réglementaire de l'urbanisme. L'évolution des textes a notamment progressivement imposé la préoccupation énergétique et climatique à toute procédure d'urbanisme et a ouvert un champ essentiel pour la qualification des opérations d'aménagement sur le plan environnemental. Grâce à la loi SRU (Loi n° 2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains), les performances énergétiques et environnementales des projets d'aménagement se gèrent désormais en partie au niveau des documents d'urbanisme, SCoT (Schéma de

Cohérence Territoriale) et PLU (Plan Local d'Urbanisme). Cette loi a imposé la prise en compte du développement durable à tout document d'urbanisme via l'obligation d'élaborer un PADD (Projet d'Aménagement et de Développement Durable) sur les problématiques de l'environnement, de l'habitat et des déplacements dans les SCoT et les PLU. Ces documents sont une prérogative des collectivités, ce qui leur confère des responsabilités nouvelles en termes de développement territorial durable. Elles doivent désormais envisager leurs politiques d'urbanisme comme de véritables outils d'aménagement durable en cohérence avec les engagements nationaux pour l'environnement tels que la loi dite Grenelle 2 qui précise les obligations réciproques de l'Etat et des collectivités ainsi que les fondements réglementaires qui permettent d'inscrire les orientations fixées au plan national dans les politiques d'urbanisme.

Par ailleurs, les politiques européennes et françaises fixent des objectifs quantitatifs en matière de lutte contre le changement climatique, d'efficacité énergétique et de développement des énergies renouvelables tels que le « 3 fois 20 » (réduction des consommations d'énergie, pénétration des énergies renouvelables et diminution des émissions de gaz à effet de serre de 20% à l'horizon 2020) ou le « facteur 4 » (Division par 4 des émissions de Gaz à Effet de Serre d'ici 2050) (Von Weizsäcker et al. 1998). Ces objectifs sont à mettre en perspective avec les impacts environnementaux de l'urbanisation. Ainsi, près de 80% de la population française vit dans les agglomérations où 70% des GES sont émis, et ces deux chiffres sont en augmentation. L'urbanisme durable s'impose donc comme un levier incontournable pour l'atteinte de ces différents objectifs.

1.2.2. Le quartier : échelle de travail décisive pour le développement urbain durable

La ville est un lieu de concentration des nuisances (pollution de l'air et des sols, nuisances sonores, production de déchets, consommations des ressources naturelles, artificialisation des sols, etc.) et exerce sur l'environnement une très forte pression (impacts sur l'eau, la biodiversité, la consommation de ressources non renouvelables, etc.). La ville est donc un système au sein duquel de très nombreuses problématiques et enjeux du développement durable se croisent et se concrétisent. En cela, la ville replacée dans le contexte plus large du territoire, constitue une échelle de traitement décisif pour le développement urbain durable.

Cependant l'échelle de la ville n'est pas la seule échelle de travail pour un urbanisme durable. En effet, un véritable processus d'aménagement urbain durable ne peut se faire que par l'intégration du développement durable dans les réflexions associées à l'ensemble des échelles de l'urbanisme ; l'échelle du grand territoire qui correspond à l'échelle du SCoT, l'échelle de la ville, du projet urbain qui est l'échelle du PLU et enfin l'échelle de l'urbanisme opérationnel c'est-à-dire celle d'un projet mettant en œuvre une procédure d'aménagement telle que ZAC (Zone d'Aménagement Concerté), Lotissement ou encore ORU (Opération de Renouvellement Urbain).

L'échelle du grand territoire est l'échelle des grands choix stratégiques en matière de développement et d'organisation d'un territoire.

L'échelle du projet urbain est une échelle de régulation entre une logique publique de développement et de renouvellement urbain, et une logique privée d'investissement foncier et immobilier.

L'échelle de l'opération d'aménagement est l'échelle où les orientations politiques locales, générales ou sectorielles s'appliquent sur un projet concret.

Le quartier n'est pas une notion précisément définie en terme d'échelle ainsi Charlot-Valdieu & Outrequin (2012) proposent d'en retenir la définition de Georges Perec, à savoir, une « portion de ville dans laquelle on se déplace à pied ou, pour dire la même chose sous la forme d'une lapalissade, une partie de la ville

dans laquelle on n'a pas besoin de se rendre, puisqu'on y est ». En pratique, L'échelle du quartier se confond souvent avec l'échelle de l'urbanisme opérationnel, et est aujourd'hui largement reconnue comme une échelle de première importance pour le développement durable de la ville. C'est en effet l'échelle de l'urbanisme opérationnel qui consiste en la conception et mise en œuvre de projets d'aménagement qui doivent prendre en compte le contexte local et intégrer les exigences des politiques définies aux échelles plus larges.

Cette reconnaissance s'est traduite notamment en France par l'élaboration en 2009 puis en 2011, par le MEDDTL (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des transports et du Logement) d'une grille EcoQuartier et du label associé, ayant pour vocation d'aider les collectivités à répondre aux enjeux de la ville durable via leurs opérations d'aménagement.

Charlot-Valdieu & Outrequin (2012) proposent la définition opérationnelle suivante d'un projet d'écoquartier : un projet de quartier durable ou d'écoquartier est une démarche territoriale de développement durable, c'est-à-dire une démarche-projet transversale, prospective, cohérente et participative qui doit répondre à des enjeux (à la fois globaux et locaux) et contribuer à la durabilité de la ville. Et ils précisent que les quatre piliers d'une stratégie durable à l'échelle quartier sont :

- répondre aux différents enjeux globaux de la planète : l'effet de serre, la préservation des ressources et de la biodiversité, etc.
- répondre aux enjeux locaux (environnementaux, sociaux et économiques) afin d'assurer la qualité de vie des habitants et usagers. Ces enjeux locaux sont déterminés à l'issue d'un diagnostic territorial de développement durable ; lequel définit l'état zéro ou initial du territoire avant la mise en œuvre du projet.
- prendre en compte les enjeux territoriaux et contribuer à la durabilité du territoire (ville ou agglomération) dans lequel il se trouve
- mettre en œuvre une nouvelle gouvernance

L'échelle du quartier est l'échelle pertinente pour traiter de nombreux enjeux du développement urbain durable comme le montre la définition officielle que le MEDDTL donne de l'EcoQuartier, à savoir « un EcoQuartier est le développement d'un quartier durable englobant des considérations liées aux transports, à la densité et aux formes urbaines, à l'écoconstruction, mais également à une mixité sociale et fonctionnelle et à la participation de la société civile » (MEDDTL, 2011).

1.2.3. Le besoin d'outils d'aide à la conception pour l'intégration du développement durable dans les opérations d'aménagement

Comme nous l'avons vu, le quartier (compris comme échelle de l'opération d'aménagement) concentre de très nombreux enjeux du développement durable. Et ces enjeux environnementaux, sociaux et économiques sont en très forte interaction ce qui fait du développement urbain durable un sujet particulièrement complexe, interdisciplinaire et transversal. Cette complexité se traduit notamment par un besoin des professionnels de l'aménagement en outils d'aide à la décision, d'aide à la conception, d'évaluation et d'aide à la réalisation pour des opérations d'aménagement durable. Ces outils doivent permettre aux acteurs de l'urbanisme d'intégrer de façon volontaire les finalités du développement durable comme des composantes normales intrinsèques à la réflexion, à la conception et à la réalisation du projet d'urbanisme, et non comme des contraintes à lever ou à traiter de manière subsidiaire, encore moins comme un complément ou un bonus.

En effet, les architectes et urbanistes sont confrontés à la conception de bâtiments et d'espaces urbains (espaces publics, voiries, quartiers et villes) pour des habitants de tous types (âge, sexe, revenus, etc.) et dans différents contextes, et leur pratique professionnelle est obligée aujourd'hui de répondre à une demande publique et privée ayant un objectif affiché de projet urbain durable. Cette modification de la demande, dans un contexte environnemental sensible et contraignant, a mis en évidence une carence de connaissances de la part des concepteurs urbains sur les thématiques qui lient l'urbanisme et l'environnement, la sectorisation des recherches sur les effets de l'urbanisme, les limites des outils de l'architecte et l'inadéquation des nouveaux outils techniques pour les concepteurs et décideurs dans la conception et concrétisation d'un projet urbain durable (Yepez-Salmon 2011).

Il existe en réalité aujourd'hui de très nombreux outils qui adressent le sujet du développement urbain durable. On trouve par exemple d'une part de nombreux outils qui s'apparentent à des « référentiels écoquartiers », et d'autres part des logiciels de modélisation de certains aspects du fonctionnement de la ville, tels que la modélisation couplée des systèmes de transport et d'occupation des sols, ou encore la simulation du microclimat urbain et de ses impacts sur les bâtiments et les espaces publics via la modélisation des interactions entre la forme urbaine et le climat local.

Charlot-Valdieu & Outrequin (2012) définissent un référentiel écoquartier comme « un outil d'aide à la décision et à la mise en œuvre de projets d'écoquartier ainsi qu'un outil d'évaluation au service d'une stratégie d'amélioration continue, un outil de dialogue renforçant la transversalité des projets et un outil de communication ». Ils précisent par ailleurs que ce n'est ni un outil universel ni un outil immuable et qu'au contraire il doit être évolutif et modulable en fonction du contexte local.

Ces référentiels sont généralement des guides qui constituent un support à la conception d'opérations d'aménagement durable en proposant un questionnement sur l'ensemble des dimensions du développement durable, organisé par thèmes mais mettant l'accent sur les interdépendances entre thèmes. Aux thèmes sont associés des enjeux et des objectifs, et un système d'indicateurs qualitatifs et quantitatifs vient compléter le dispositif pour permettre l'évaluation des projets. Il existe toute une typologie d'outils qui correspondent pour tout ou partie à cette définition du « référentiel écoquartier » et qui ont pour le moins en commun la volonté d'organiser et de promouvoir la réflexion sur le développement durable au cœur des projets. Ainsi, on peut distinguer :

- les « grilles de questionnement » telles que la grille EcoQuartier du MEDDTL
- les « tableaux de bord » d'indicateurs d'état ou de résultat
- les labels et certification à l'échelle de l'opération d'aménagement, tels que LEED-ND (USA), HQE-Aménagement (FR), BREEAM Communities (UK), DGNB (DE), ou encore CASBEE Urban Development (Japon)
- les chartes, des documents-cadre qui précisent les objectifs de la collectivité
- les véritables « référentiels écoquartier »

Ces référentiels proposent une vision intégrée de la conception des opérations d'aménagement mais ne permettent le plus souvent pas d'évaluer les projets dès les phases amont de conception dans l'idée de pouvoir tester des variantes pour aboutir à un projet globalement optimisé.

A l'opposé de cette vision holistique proposée par les outils de type « référentiels » on trouve de nombreux outils monothématiques qui sont des outils experts. Ces outils, souvent basés sur la modélisation de sous-systèmes qui composent le quartier et sur la simulation de leur fonctionnement, permettent de réaliser des diagnostics précis du fonctionnement de ces sous-systèmes, mais nécessitent des ressources et plus encore des données dont on ne dispose pas encore au moment des phases les plus amont de conception des projets.

Dans ce cadre Yopez-Salmon (2011) a mis en lumière un besoin d'outil d'aide à la conception ou d'éco-conception des opérations d'aménagement, à l'échelle quartier, et basé sur l'évaluation de la performance environnementale des projets. Dans le cadre de ces travaux a été développé un outil répondant à ce cahier des charges et baptisé NEST (*Neighborhood Evaluation for Sustainable Territories*). L'ambition étant de répondre à une demande des concepteurs de projets d'aménagement pour des outils proposant à la fois une approche holistique du développement durable ainsi qu'une évaluation quantitative des impacts environnementaux des projets, et ce afin de pouvoir comparer des options de conception dès les phases les plus amonts de la conception des projets.

Ainsi NEST a été conçu comme un compromis entre opérationnalité et intensité scientifique, ainsi qu'une vision holistique du projet de quartier durable et évaluation quantitative d'un nombre limité d'indicateurs essentiels et traduisant les préoccupations des maîtres d'ouvrage d'opérations d'aménagement ainsi que des architecte-urbanistes. Sur la base d'un modèle 3D du quartier, NEST réalise une évaluation du projet à travers 7 indicateurs. Cinq indicateurs portent sur les thématiques environnementales suivantes ; énergie, CO₂, déchets, qualité de l'air, eau. L'outil propose également un indicateur relatif à la qualité de vie proposée par le projet, ainsi qu'un indicateur économique qui traduit le coût de la mise à disposition du quartier ainsi que certains coûts d'usage.

Suite à l'étude de l'éventail des méthodes et outils d'évaluation environnementale, le choix a été fait de l'ACV comme base méthodologique pour l'évaluation environnementale dans l'outil NEST. Ainsi les indicateurs énergie et CO₂ de NEST sont des indicateurs ACV qui mesurent respectivement les consommations d'énergie primaire et les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) sur la totalité du cycle de vie du quartier.

Nos travaux de thèse sont menés avec un objectif d'intégration à l'outil NEST, et ce afin de l'enrichir de sorte notamment qu'il puisse mettre en valeur les propositions qui s'appuient sur le bioclimatisme pour apporter des réponses adaptées au site. Ces objectifs d'opérationnalité nous poussent donc à la recherche d'un compromis entre acuité des méthodologies développées et possible appropriation par les concepteurs de projet.

1.2.4. L'analyse de cycle de vie : une méthode d'évaluation prometteuse pour les opérations d'aménagement

L'analyse de cycle de vie est un outil d'évaluation environnementale standardisé (normes ISO 14040, 2006a) et ISO 14044, 2006b) (ISO 2006a; ISO 2006b) et largement reconnu au niveau mondial. Cet outil quantifie les impacts d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie (de l'extraction des matières premières, à sa production, distribution, utilisation et jusqu'à la gestion de sa fin de vie). A la différence d'autres outils d'évaluation environnementale (par exemple, l'empreinte carbone ou le bilan énergétique), l'ACV est une approche à la fois multicritère, c'est-à-dire évaluant plusieurs catégories d'impacts, et multi-étapes, c'est-à-dire embrassant le « cycle de vie » d'un bien ou d'un service. Ce caractère holistique permet d'éviter les transferts de pollution entre différentes catégories d'impacts environnementaux, ainsi qu'entre différentes phases du cycle de vie ou entre lieux géographiques.

L'ACV est fondée sur une approche fonctionnelle : les impacts potentiels d'un bien ou d'un service sont quantifiés par unité de « service rendu » (unité fonctionnelle). L'approche fonctionnelle offre la possibilité de dématérialiser les besoins (ce qui est pourvoyeur de solutions innovantes) et donc de comparer des biens et services sur une base commune (Jolliet et al. 2005).

L'ACV est une méthode initialement « orientée produit » qui a été conçue dans le but d'apporter des éléments d'information sur les biens et les services au public (éco-étiquetage), aux décideurs

(réglementations) ainsi qu'aux industriels (éco-conception) (Guinée et al. 1993). A la fin des années 1990 des développements tels que le projet européen REGENER (Peuportier et al. 1997) ont proposé les grandes lignes de l'application de l'ACV au secteur du bâtiment. Puis l'ACV s'est peu à peu imposée comme une méthode d'évaluation des impacts environnementaux des matériaux et produits de construction. Elle gagne également du terrain pour ce qui concerne l'évaluation environnementale des bâtiments, avec par exemple la publication par l'association HQE du référentiel « HQE Performance » qui intègre l'ACV et qui tranche avec son référentiel précédent qui abordait de façon disjointe des cibles environnementales.

Des propositions récentes ont été émises afin d'élargir à la fois l'objet d'étude et le champ des indicateurs en ACV (Guinée et al. 2011). Ces propositions mettent l'accent sur un des axes de développement qui consiste à étendre l'objet d'analyse de l'ACV, centré initialement sur le service ou le produit, à l'analyse de systèmes couvrant des échelles plus larges comme les collectivités territoriales (municipalités).

NEST s'inscrit dans cette dynamique et fait partie des premiers développements qui ont été menés afin d'adapter l'ACV à l'évaluation des opérations d'aménagement dans une volonté de fournir aux professionnels un outil d'écoconception ou d'aide à la conception des opérations d'aménagement. Comme nous l'avons vu précédemment, l'ACV est une approche à la fois multicritère et embrassant le « cycle de vie » d'un bien ou d'un service. Ce caractère holistique, qui permet d'éviter les transferts de pollution (entre catégories d'impacts, entre phases du cycle de vie ou entre lieux géographiques) fait écho à l'approche holistique requise pour la conception d'un quartier durable.

A l'heure actuelle, l'application de l'ACV à l'évaluation des opérations d'aménagement reste encore une activité de recherche et développement avec peu de cas d'étude publiés (Lotteau et al. 2015), et pose de nombreuses questions méthodologiques, telles que la définition de l'unité fonctionnelle, la prise en compte des aspects temporels ou encore la prise en compte du contexte local (Peuportier 2013).

Typiquement, L'ACV d'une opération d'aménagement ne peut pas consister simplement en l'agrégation des ACV des bâtiments qui la composent. En effet une approche d'éco-conception à l'échelle du quartier élargit les degrés de liberté par rapport à l'échelle d'un bâtiment (Herfray et al. 2011). Par exemple, l'organisation du plan masse permet de travailler sur la compacité et l'exposition des bâtiments, certains équipements peuvent par ailleurs être mutualisés (réseau de chaleur, silo de stationnement etc.). Ces interactions complexes entre les composantes peuvent avoir un rôle important dans la façon dont un quartier va se comporter en tant que système physique et donc influencer sur l'environnement.

1.2.5. Le besoin de prise en compte de la forme urbaine et du microclimat dans l'ACV des projets d'aménagement en phase esquisse

Dans le contexte énergétique actuel et vu la proportion majoritaire de consommation d'énergie associée à l'environnement bâti, les questions énergétiques deviennent centrales à l'écoconception des opérations d'aménagement et il devient essentiel de se diriger vers une architecture à haute performance énergétique, c'est-à-dire notamment capable d'exploiter au mieux les ressources énergétiques de l'environnement, mais également capable de limiter la part d'énergie grise liée aux matériaux de construction.

A l'échelle du bâtiment, les « récents » gains de performance énergétique ont été en grande partie obtenus par une stratégie de réduction des pertes par l'isolation progressive des enveloppes bâties et l'amélioration de la performance thermique des surfaces vitrées (du verre simple au double vitrage à lame d'argon, et aujourd'hui au triple vitrage en fonction des climats). Cette stratégie de limitation des déperditions thermiques semble aujourd'hui atteindre ses limites. Dans ce contexte, on assiste à une remise au goût du jour des principes de l'architecture bioclimatique (travailler sur les interactions du

bâtiment avec son environnement, sur l'exploitation par le bâtiment des ressources de l'environnement, plutôt que de l'isoler de son environnement). Comme l'a montré le projet ANR VALERIE (Duforestel et al. 2012), c'est dans l'association de ces deux stratégies, isolation et bioclimatisme, que se trouve la marge de manœuvre pour des bâtiments encore plus performants.

Les questions solaires et climatiques en lien avec la forme urbaine influencent fortement la performance environnementale d'une opération d'aménagement en déterminant notamment la capacité du projet à exploiter au mieux les ressources énergétiques de l'environnement. Par exemple, le potentiel énergétique d'un bâtiment est fortement conditionné par son niveau d'exposition au rayonnement solaire, qui influence entre autre les besoins en chauffage, refroidissement et éclairage artificiel. Et ce niveau d'exposition est déterminé par la forme urbaine et les types de surfaces urbaines.

Cette influence est déterminée en partie par des décisions à l'échelle de l'opération d'aménagement et prises très en amont dans la conception (trame viaire, orientation et gabarits des bâtiments, type de surfaces, ...). Il y a donc un véritable besoin lié à la prise en compte de ces questions dès l'esquisse afin de produire un projet d'aménagement à faible impact environnemental.

Or, à ce stade, peu d'outils existent pour travailler ces questions dès la phase esquisse des projets d'aménagement, et qui permettraient à l'équipe de conception de ménager les potentiels bioclimatiques du projet (qui ne seront réalisés que plus tard par les architectes dans les phases de conception des bâtiments).

L'étude des paramètres microclimatiques en lien avec la forme urbaine présente en réalité un intérêt double. Elle permet d'une part l'étude, du point de vue énergétique, des interactions entre un bâtiment et son environnement proche (impacts de l'aménagement et des bâtiments voisins sur le bâtiment en question (Bouyer 2009; Gros 2013), et impact du bâtiment en question sur les bâtiments voisins), et d'autre part l'étude des conditions de confort dans les espaces intérieurs et extérieurs (Athamena 2012; Nikolopoulou 2004).

La performance énergétique d'un projet sur l'ensemble de son cycle de vie, dépend fortement de la forme urbaine proposée. Celle-ci a une influence d'une part sur l'énergie grise du projet et d'autre part sur les consommations énergétiques du projet (notamment pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage). Dans un objectif de conception de projets d'aménagement à haute performance énergétique, il faut donc que l'ACV de quartier puisse rendre compte de cette dépendance de la performance énergétique à la forme urbaine et au climat local.

Or, il existe à l'heure actuelle deux principales orientations pour l'application de l'ACV à l'échelle du quartier ; i. une approche détaillée, qui passe notamment par la description fine des bâtiments ainsi que par l'application aux bâtiments de méthodes de simulation thermique pour accéder aux consommations énergétiques, et ii. une approche simplifiée, qui évalue le bâti sur la base de données statistiques. La première famille d'approche permet de traiter la dépendance de l'énergie grise et des consommations énergétiques à la forme urbaine et aux aménagements, mais de par le niveau de données qu'elle requiert elle n'est pas adaptée aux phases amont de la conception des projets d'aménagement. La seconde famille, dont fait partie l'outil NEST, est clairement orientée vers l'évaluation pour l'aide à la conception très en amont, mais ne permet pas la prise en compte des interactions entre la forme urbaine et la performance énergétique du projet sur l'ensemble de son cycle de vie.

Ce constat étant établi, il nous paraît nécessaire de développer une approche intermédiaire, adaptée aux phases amont de conception. Cette méthodologie intégrerait deux volets qui chacun auraient pour vocation de préciser les données d'inventaire de cycle de vie du projet. Le premier volet porterait sur

l'évaluation de l'énergie grise à l'échelle du quartier, et le second volet sur l'évaluation des consommations d'énergie des bâtiments, en tenant compte de l'influence de la forme urbaine et des aménagements. Ces apports se traduiront en termes d'aide à la conception sur la thématique de l'influence de la forme urbaine sur la performance énergétique des bâtiments.

Par ailleurs, la prise en compte des questions solaire et climatique est un besoin exprimé. Elle apparaît notamment dans les différents référentiels « quartiers durables » tels que HQE Aménagement, LEED ND ou BREEAM Communities, qui qualifient les questions de bioclimatisme (apports solaires, éclairage et ventilation naturels, ...) et de confort (hygrothermique, lumineux, au vent, ...) d'enjeux de développement durable.

1.3. PROBLEMATIQUE

De par l'ampleur et la multiplicité des pressions qu'il exerce sur l'environnement, le milieu urbain s'impose comme un levier incontournable pour l'atteinte des objectifs sous-tendant un développement humain durable, tels que la lutte contre le changement climatique, la préservation de la biodiversité, des milieux ou des ressources.

L'urbanisme durable se traite par l'intégration des politiques et de la pratique des projets à différents échelles. Les documents d'urbanismes SCoT et PLU établissent, aux échelles du grand territoire et de la ville, un cadre réglementaire qui tient de plus en plus compte des questions de durabilité. Nous situons notre recherche à une échelle différente, celle du quartier (voire de l'îlot), qui est l'échelle de la mise en œuvre des opérations d'aménagement, de la conception et de la concrétisation des projets.

La durabilité d'une opération d'aménagement est une problématique complexe, interdisciplinaire et ne peut être efficacement traitée que dans le cadre d'une conception transversale intégrée. De la multiplicité des problématiques sectorielles mais interdépendantes naît le besoin d'outils d'évaluation multicritères des projets. Ces outils doivent être des supports à la conception intégrée, en permettant de mesurer la performance de différentes alternatives de projets et d'éclairer les arbitrages entre les nécessaires compromis à trouver entre les différentes dimensions du développement durable, les impératifs sociaux et les impératifs économiques.

L'analyse de Cycle de Vie qui s'est déjà imposée comme méthode d'évaluation des impacts environnementaux des produits et matériaux de construction est également de plus en plus recommandée pour l'évaluation des bâtiments. Son application à l'échelle d'une opération d'aménagement est encore à l'heure actuelle de l'ordre de la recherche et du développement, cependant elle a clairement été identifiée comme un potentiel outil d'aide à la conception à cette échelle.

Par ailleurs, dans le contexte actuel, notamment de lutte contre le changement climatique, il est nécessaire de se diriger vers une architecture à haute performance énergétique. Dans le cadre d'une opération d'aménagement, il n'y a généralement pas de continuité des équipes de conception entre la conception de l'aménagement et la conception des bâtiments. Or la performance énergétique des bâtiments est en partie conditionnée par les choix de conception en termes d'aménagement, et notamment par la forme urbaine (orientation, compacité, densité, etc.) et ses interactions avec le climat (ensoleillement, exposition aux vents, présence de végétation, choix des matériaux, etc.). Il nous semble donc nécessaire qu'un outil d'aide à la conception permette de travailler sur l'influence des options d'aménagement (forme urbaine et types de surfaces) sur les potentiels énergétiques des bâtiments et plus largement du quartier.

Dans l'objectif de développer des outils d'aide à la conception des opérations d'aménagement durables, nous choisissons donc d'axer notre recherche sur les questions de l'application de l'ACV à l'échelle du quartier et de son enrichissement par l'analyse morpho-climatique des projets d'aménagement.

Notre question de recherche est la suivante :

« Est-il possible à l'échelle quartier et en phase amont de conception, d'enrichir l'Analyse de Cycle de Vie d'un projet d'aménagement par les apports de l'analyse morpho-climatique pour mesurer et améliorer sa performance environnementale, notamment énergétique, au regard des services rendus ? »

1.4. HYPOTHESE, OBJECTIFS ET PLAN DE TRAVAIL

A partir des éléments de contexte présentés ci-dessus, à savoir :

- le besoin d'outils d'aide à la conception des opérations d'aménagement durable et de mesure de leurs impacts environnementaux
- la montée en puissance de l'ACV pour l'évaluation des impacts environnementaux à l'échelle du quartier
- la recherche d'optimisation de la performance énergétique des opérations d'aménagement qui passe par une réflexion à l'échelle du quartier et pas seulement à l'échelle des bâtiments

Nous posons les hypothèses suivantes, sur lesquelles nous baserons nos travaux de recherche, et que nous tâcherons de questionner et de valider :

- Hypothèse 1 : L'ACV appliquée à l'échelle du quartier est un outil d'aide à la conception pertinent pour la conception d'une opération d'aménagement et ce dès la phase esquisse. Elle présente cependant des limites, parmi lesquelles la difficulté de prise en compte de la forme urbaine
- Hypothèse 2 : La forme urbaine a une influence importante sur l'énergie grise du quartier, et il est pertinent d'en développer une approche d'évaluation intermédiaire à l'échelle du quartier, entre les approches à échelle bâtiment et les approches classiques à échelle quartier/ville
- Hypothèse 3 : Les interactions entre le projet d'aménagement (forme urbaine et types de surfaces), son environnement proche et le climat local (problématique morpho-climatique) constituent un élément de contexte important dont la prise en compte est nécessaire dès la phase d'établissement du plan masse d'une opération d'aménagement
- Hypothèse 4 : L'analyse morpho-climatique d'une opération d'aménagement peut enrichir les données d'inventaire de la phase d'usage des bâtiments dès la phase d'établissement du plan masse d'une opération d'aménagement

De ces hypothèses découle notre thèse qui est la suivante :

« Il est possible et pertinent de développer un outil d'aide à la conception des opérations d'aménagement, adapté à la phase d'établissement du plan masse et basé sur la méthode de l'analyse de cycle de vie enrichie par les apports de l'analyse morpho-climatique pour le traitement des potentiels énergétiques des bâtiments et du quartier ».

L'objectif principal de nos travaux, déjà énoncé plus haut, est de proposer aux équipes de conception d'opérations d'aménagement un moyen de prendre en compte l'influence de la forme urbaine sur les potentiels énergétiques du quartier avec perspective cycle de vie.

Afin d'organiser notre recherche, nous proposons de décomposer cet objectif principal en sous-objectifs :

- Sous-objectif 1 : Réaliser une revue critique des cas d'étude publiés d'analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier, et dégager les difficultés d'application, les défis méthodologiques et besoins de recherche associés.
- Sous-objectif 2 : Expliciter l'influence des leviers de conception du projet d'aménagement, notamment la forme urbaine et le choix des types de surface, sur les potentiels énergétiques du projet à l'échelle du quartier.
- Sous-objectif 3 : Développer une méthodologie d'évaluation de l'énergie grise à l'échelle du quartier capable de rendre compte de l'influence de la forme urbaine et compatible avec la phase esquisse d'un projet d'aménagement urbain.
- Sous-objectif 4 : Développer une méthodologie d'évaluation des besoins de chaud et de froid à l'échelle du quartier capable de rendre compte de l'influence de la forme urbaine et compatible avec la phase esquisse d'un projet d'aménagement urbain.

Ce mémoire est structuré en chapitres dont l'objet est de répondre à chacun des sous-objectifs présentés ci-dessus. La démarche générale est présentée dans la Figure 1.

Dans le Chapitre 2, nous présentons une revue critique sur l'application de l'ACV à l'évaluation de l'environnement bâti à l'échelle du quartier. Cette analyse détaillée de 21 cas d'étude tirés de la littérature nous permet de faire un état des lieux des pratiques actuelles, de dégager les principaux résultats de ces évaluations ainsi que les défis méthodologiques et besoins de recherche associés à ce champ d'application de l'ACV. Cette revue critique nous permet de répondre à notre premier sous-objectif.

Le Chapitre 3 est un état de l'art sur les interactions entre forme urbaine, climat et énergie. Nous y présentons les bases théoriques, ainsi que des résultats d'étude relatifs à la modélisation climatique urbaine à l'échelle du quartier, la modélisation de la performance énergétique des bâtiments en milieu urbain, et les approches morphologiques d'évaluation des potentiels bioclimatiques à l'échelle du quartier. Ce état de l'art nous permet de répondre partiellement à notre second sous-objectif.

Dans le Chapitre 4 nous présentons un modèle simplifié pour l'évaluation de l'énergie grise et de l'empreinte carbone des bâtiments à l'échelle du quartier. Nous proposons une application de ce modèle aux bâtiments résidentiels collectifs en béton et dans le contexte français. Nous procédons à une analyse de sensibilité de ce modèle afin d'étudier en détail l'influence de la forme des bâtiments sur leur énergie grise et leur empreinte carbone, et ainsi mettre en évidence l'intérêt de la prise en compte des liens entre forme urbaine et énergie grise pour l'évaluation de projets d'aménagement en phase amont de conception. Ces travaux sont une réponse à notre troisième sous-objectif.

Au Chapitre 5, nous proposons une analyse de l'influence de la morphologie urbaine sur les potentiels bioclimatiques à l'échelle du quartier. Cette étude est basée sur une campagne de simulations thermo-radiatives réalisées avec le logiciel SOLENE sur deux cas d'étude : un écoquartier dense, et une opération de rénovation d'un quartier de type grand ensemble. Cette étude qui nous permet de dégager l'influence relative des différents leviers de conception de l'urbaniste sur les potentiels énergétiques d'un quartier, vient compléter les enseignements de notre état de l'art pour affiner la réponse à notre second sous-objectif.

Dans le Chapitre 6 nous présentons une approche de modélisation des besoins de chauffage et de climatisation des bâtiments à l'échelle du quartier. Cette approche est utilisable sur la base des informations disponibles au stade du plan masse d'un projet d'aménagement. Elle repose sur i. la transformation d'une forme urbaine réelle en forme urbaine générique équivalente (réseau régulier de bâtiments de type bloc) qui conserve les principales caractéristiques morphologiques du tissu urbain à évaluer, et ii. le développement de métamodèles du moteur de simulation thermique dynamique

EnergyPlus pour l'évaluation en temps réel des besoins thermiques de la forme urbaine générique. La méthode ainsi proposée est ensuite testée sur 45 cas d'étude afin d'en définir des critères d'applicabilité et des seuils de significativité des résultats obtenus. Ces travaux apportent une réponse à notre quatrième sous-objectif.

Enfin dans le Chapitre 7 nous proposons une discussion générale de nos travaux, incluant l'interprétation de nos résultats, la discussion des limites de nos travaux, ainsi que les possibilités d'intégration à l'outil NEST.

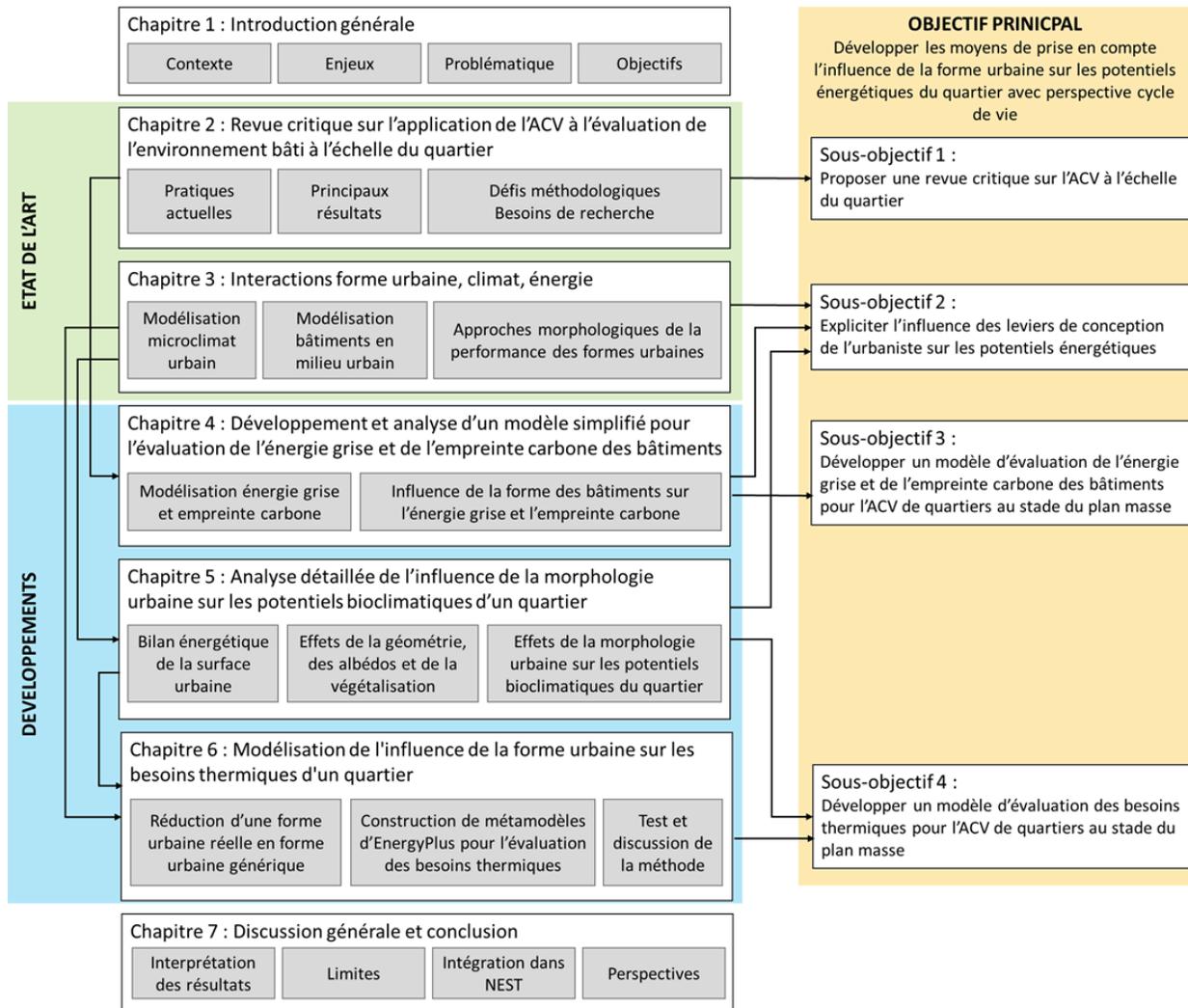


Figure 1 - Structure de la thèse

Chapitre 2. Revue critique sur l'application de l'Analyse de Cycle de Vie à l'évaluation de l'environnement bâti à l'échelle du quartier¹

2.1. INTRODUCTION

L'analyse des impacts environnementaux de l'environnement bâti est abordée dans un large éventail de méthodologies à la fois à l'échelle du bâtiment et à l'échelle de la ville.

À l'échelle du bâtiment, parmi diverses méthodologies (p. ex., modèles statistiques, simulation), l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est la méthodologie scientifique clairement acceptée pour l'évaluation environnementale des bâtiments sur toute leur durée de vie, et tenant compte des impacts en amont (Anderson et al. 2015). Plusieurs états de l'art ont été réalisés sur l'ACV dans le secteur de la construction (Ortiz et al. 2009; Buyle et al. 2012; Cabeza et al. 2014; Karimpour et al. 2014). Ces états de l'art classent les études d'ACV en fonction de leur échelle d'analyse, depuis les matériaux de construction jusqu'à l'ensemble du processus de construction (Ortiz et al. 2009). Ils soulignent tous que les études de cas publiées sont difficilement comparables en raison de leurs propriétés spécifiques telles que le type de bâtiment, le climat, les exigences de confort, les réglementations locales, etc. Néanmoins, des tendances peuvent être identifiées telles que la prédominance de la phase d'exploitation (en particulier en raison des consommations d'énergie liées au chauffage et à la climatisation) et l'augmentation de la part et de la valeur absolue de l'énergie grise pour les bâtiments basse consommation. En ce qui concerne les aspects méthodologiques, la majorité des ACV de bâtiments sont monocritères et se limitent à une évaluation énergétique du cycle de vie (Life Cycle Energy Assessment, LCEA), plutôt qu'à des évaluations multicritère complètes (abordant une plus large gamme d'impacts environnementaux) (Cabeza et al. 2014).

À l'échelle de la ville, les méthodes d'évaluation pour la quantification des impacts environnementaux sont nombreuses. Baynes et Wiedmann (Baynes & Wiedmann 2012) examinent ces approches selon trois catégories : les approches basées sur la consommation (*Consumption-Based Approaches*, CBA), les approches basées sur le métabolisme (*Metabolism-Based Approaches*, MBA) et les approches relevant des systèmes complexes. Les méthodes CBA évaluent les impacts en fonction de données économiques, telles que la consommation et les modes de vie urbains. La méthode CBA la plus couramment utilisée est l'*Environmentally-Extended Input Output Analysis* (EE-IOA). Elle permet d'évaluer les consommations d'eau et d'énergie (directe et indirecte), ainsi que les impacts environnementaux liés à ces consommations (ex. empreinte écologique ou émissions de gaz à effet de serre (GES)). Les méthodes de type MBA comptabilisent les flux de matériaux, d'eau, de déchets et d'énergie d'une zone urbanisée. Il s'agit fondamentalement d'analyses des flux de matières et d'énergie (*Materials and Energy Flow Analysis*, MEFA). Les méthodes MBA sont de plus en plus capables de rendre compte des impacts indirects du système d'étude et des impacts hors des frontières du système. Les méthodes de type systèmes complexes explicitent les relations de cause à effet en modélisant les interactions entre les différents composants du système urbain. Ces développements sont plus récents et cherchent à modéliser dans leur complexité, les dynamiques des villes et ce à différentes échelles.

Selon Anderson et al. (Anderson et al. 2015) l'ACV est une méthode importante pour l'analyse aux échelles urbaines et est complémentaire des approches de type CBA et MBA. En effet, les techniques d'ACV hybrides apparaissent prometteuses pour réaliser une combinaison des méthodes CBA et MBA (Baynes & Wiedmann 2012). Dans leur examen des outils et méthodes existants pour l'évaluation des impacts

¹ Ce chapitre est adapté de la publication Lotteau, M., Loubet, P., Pousse, M., Dufrasnes, E., Sonnemann, G., 2015. Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. *Building and Environment*, 93, pp.165–178.

environnementaux à l'échelle du territoire, Loiseau et al. (Loiseau et al. 2012) ont étudié en détail un ensemble de méthodes basées sur l'étude des flux de matériaux et d'énergie (c.-à-d. L'évaluation des risques sur l'environnement et la santé, l'empreinte écologique, l'analyse des flux de matières, l'analyse de flux de substances, les tableaux entrées-sorties de flux physiques, l'analyse des réseaux écologiques, l'exergie, l'émergie et l'ACV). Les auteurs montrent que l'ACV fournit un cadre pertinent et est la seule méthode qui peut éviter les transferts de pollution entre les étapes du cycle de vie, les impacts environnementaux et les territoires.

On observe actuellement un intérêt croissant pour l'échelle du quartier dans le domaine de l'évaluation de la durabilité urbaine. Il s'agit d'une échelle opérationnelle typique pour les projets de développement urbain et elle intègre des leviers clés pour l'éco-conception urbaine. Ce changement d'échelle est en partie motivé par la nécessité de mobiliser des leviers de conception relatifs au projet d'aménagement (et donc à l'échelle quartier) pour concevoir des bâtiments et des quartiers toujours plus performant du point de vue environnemental. C'est notamment une échelle essentielle pour aborder des thématiques clés, telles que la conception bioclimatique, la mutualisation des équipements (p. ex. les réseaux de chaleur urbains), la densité urbaine ou encore les problèmes de mobilité. Par exemple, les décisions prises au niveau du projet d'aménagement (orientation, compacité, densité urbaine) conditionnent largement les charges de chauffage et de climatisation des bâtiments qui sont un des contributeurs majeurs au bilan énergétique d'une zone urbaine. Oliver-Solà et al. (2011) affirment qu'il est très probable que les considérations environnementales et énergétiques qui se focalisent aujourd'hui sur les bâtiments seront bientôt transférées à la planification à l'échelle du quartier.

Dans ce contexte, on observe un intérêt nouveau pour l'application de l'ACV à l'échelle du quartier. Nous proposons de réaliser un état de l'art sur la littérature liée à ce sujet. Cet état de l'art se présente sous la forme d'une revue critique (Lotteau et al. 2015). L'accent est mis sur 21 études de cas existantes (provenant de 14 articles) que nous analysons selon des critères issus des quatre phases des normes internationales sur l'ACV. Il résume les pratiques actuelles en termes de définition des objectifs et du périmètre d'étude, d'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) et d'évaluation des Impacts du Cycle de Vie (EICV), ainsi que les principaux résultats. Nous proposons notamment pour ce corpus d'études de cas, une comparaison des stratégies de collecte de données, ainsi qu'une comparaison des résultats d'EICV pour la demande cumulative d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

Toutes ces études visent un même objectif global, celui de fournir des informations quantitatives aux décideurs ou aux concepteurs. Cependant cette revue critique met en avant l'hétérogénéité des choix méthodologiques à toutes les étapes. Les études sont souvent basées sur des périmètres différents et se concentrent sur des problématiques différentes, ce qui entraîne notamment une grande diversité dans la définition des unités fonctionnelles et des limites des systèmes d'étude.

Un quartier est un système complexe, multifonctionnel, dynamique, et dont la durée de vie est très longue et mal connue. Ces spécificités soulèvent des problèmes spécifiques concernant par exemple la définition de l'unité fonctionnelle ou la prise en compte des aspects temporels dans l'ACV. Notre revue critique propose également une synthèse des principaux défis méthodologiques pour ce nouveau domaine d'application et les possibilités de recherche associées.

Enfin nous proposons une présentation des principaux outils logiciels dédiés à l'évaluation environnementale à l'échelle du quartier que nous avons rencontrés au travers de l'analyse de notre corpus d'études de cas. Nous en proposons notamment une comparaison avec l'outil NEST développé par NOBATEK/INEF4.

2.2. MATERIELS ET METHODES

2.2.1. Sélection du corpus de publications traitant de l'application de l'ACV à l'échelle du quartier

La présente revue critique vise à compiler les publications proposant des ACV de l'environnement bâti à l'échelle du quartier. L'environnement bâti est constitué de l'ensemble des structures, infrastructures et systèmes de transport (Anderson et al. 2015). Nous proposons ici de différencier les quatre champs de l'environnement construit tels que définis par (Popovici 2006); Les bâtiments, les espaces extérieurs (routes, espaces verts), les réseaux (télécommunications, distribution d'eau, collecte des eaux usées, distribution de chauffage, distribution d'électricité) et la mobilité. Nous avons choisi dans un premier temps de ne sélectionner que les études de cas portant sur au moins deux champs de l'environnement construit. Puis, compte tenu de l'importance des bâtiments en matière d'impacts environnementaux et du fait que la littérature sur l'ACV dans le secteur de la construction a déjà été largement analysée, nous avons ajouté à notre sélection les études de cas ne portant que sur les seuls bâtiments mais proposant une analyse à l'échelle du quartier (et non à l'échelle du bâtiment individuel pour être ensuite extrapolée à l'échelle du quartier). Finalement, la présente analyse compile (i) les études de cas comprenant plusieurs champs de l'environnement bâti et (ii) les études de cas ne concernant que les bâtiments mais dont l'analyse est effectuée à l'échelle du quartier.

2.2.2. Grille d'analyse des publications

Nous proposons d'analyser les études de cas suivant les quatre étapes de l'ACV telles que définies selon la norme ISO 14044 (ISO 2006b): définition de l'objectif et du périmètre d'étude (phase 1), inventaire du cycle de vie (ICV) (phase 2), évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) (phase 3), et interprétation des résultats (phase 4). Pour chaque phase, un ensemble de critères a été sélectionné parmi les directives ISO et ILCD (EC JRC-IES 2010b). L'ensemble des critères est détaillé ci-après et un résumé est présenté dans le Tableau 1.

2.2.2.1. Critères pour la phase 1 de l'ACV – définition de l'objectif et du périmètre d'étude

Les objectifs des études sont comparés en fonction de leurs applications et des raisons qui motivent leur réalisation. Nous différencions notamment les études concernant à l'évaluation de projets urbains à l'échelle du quartier, qui visent à produire des connaissances relatives à un projet de développement urbain spécifique, et des études concernant l'évaluation de la durabilité urbaine, qui visent à produire des connaissances générales pour éclairer la définition d'orientations ou de politiques urbaines. L'analyse de la définition du périmètre d'étude comprend (i) le choix de l'unité fonctionnelle (UF); (ii) les informations clés sur le système (localisation géographique, nombre d'habitants, taille); (iii) la définition des limites du système; et (iv) les étapes du cycle de vie considérées. En ce qui concerne les frontières du système d'étude, nous précisons si oui ou non les études de cas comprennent les différents champs de l'environnement bâti tels que définis à la section 2.2.1 : bâtiments (B), espaces extérieurs (EExt), réseaux (R) et la mobilité (M). En ce qui concerne les phases du cycle de vie, nous examinons la prise en compte des étapes de construction (extraction de matières premières, production des matériaux de construction, construction de bâtiments et infrastructures), exploitation (usage et maintenance) et fin de vie. La Figure 2 propose une représentation du système quartier telle que considérée dans le cadre de notre revue critique.

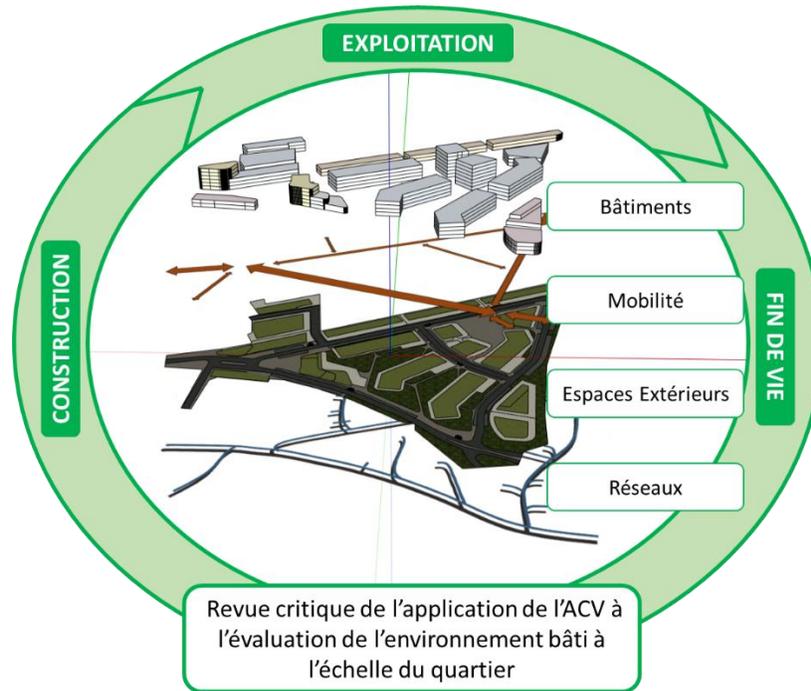


Figure 2 - Représentation du système Quartier dans le cadre de l'ACV

2.2.2.2. Critères pour la phase 2 de l'ACV - inventaire du cycle de vie

La réalisation de l'ICV est la phase de collecte de données de l'ACV. Elle consiste à suivre en détail tous les flux entrants et sortants du système, y compris les ressources et matières premières, les différents types d'énergie, l'eau et les émissions de substances spécifiques dans l'air, l'eau et le sol.

Le système d'étude est considéré comme un ensemble de processus élémentaires qui sont généralement répartis en deux catégories : les processus de premier plan et d'arrière-plan (EC JRC-IES 2010b). Le système de premier plan est défini comme l'ensemble des processus du système d'étude qui sont sous le contrôle du décideur impliqué dans l'étude (Frischknecht 1998). Le système d'arrière-plan comprend les processus qui participent au fonctionnement du système mais qui ne sont pas directement contrôlés par les décisions analysées dans l'étude.

Il existe deux approches principales pour la collecte de données: L'approche *process-based* et l'approche *input-output*. L'ACV *process-based* consiste en une analyse *bottom-up* des processus selon laquelle le système est modélisé sur la base d'informations qui lui sont spécifiques. A contrario, l'ACV *input-output* est une approche *top-down* qui utilise des données d'inventaire établies à l'échelle d'une économie ou d'un secteur industriel et les décompose pour en déduire les données relatives au système d'étude. Une troisième famille d'approche, appelée ACV hybride, consiste en une combinaison des deux premières approches.

Dans la pratique de l'ACV on distingue deux principes de modélisation qui influencent la nature des données requises pour effectuer l'analyse : la modalisation attributionnelle et la modalisation conséquentielle.

L'ACV attributionnelle s'intéresse aux impacts environnementaux potentiels qui peuvent être attribués au système d'étude au cours de son cycle de vie, et ce système est considéré comme statique (c'est-à-dire que le système de premier plan ne modifie pas le système d'arrière-plan dans lequel il est intégré). La modalisation conséquentielle vise à identifier les conséquences d'une décision dans le système de premier plan pour d'autres processus et systèmes de l'économie, tant dans le système d'arrière-plan du système

d'étude que sur d'autres systèmes. En ACV conséquentielle, le système d'étude est considéré comme dynamique (EC JRC-IES 2010b).

L'analyse de la phase d'ICV des articles examinés se concentre sur les procédures de collecte de données pour le système de premier plan et pour le système d'arrière-plan (sources de données), ainsi que sur l'exhaustivité des inventaires.

2.2.2.3. Critères pour les phases 3 et 4 de l'ACV - évaluation des impacts du cycle de vie et interprétation des résultats

Selon la norme ISO 14044 (ISO 2006a), l'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) se déroule selon deux étapes obligatoires; (i) sélection des catégories d'impact et classification, et (ii) caractérisation.

La sélection des catégories d'impact et la classification consiste à sélectionner les catégories d'impact pertinentes pour l'étude et à affecter les flux élémentaires de l'inventaire à ces catégories d'impact en fonction de la capacité des substances à contribuer à différents problèmes environnementaux (EC JRC-IES 2010a). Les catégories d'impact considérées incluent généralement le changement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'eutrophisation, l'acidification, la toxicité humaine, les particules fines, les rayonnements ionisants, l'écotoxicité, la formation d'ozone photochimique, l'utilisation du sol, la diminution des ressources en eau, et l'épuisement des ressources.

L'étape de caractérisation consiste à convertir les émissions et les ressources attribuées à chacune de ces catégories d'impact en indicateurs utilisant des modèles d'évaluation d'impact (EC JRC-IES 2010a), également appelés modèles de caractérisation. Ces modèles visent à relier chaque ICV à ses impacts environnementaux ou dommages potentiels grâce à des facteurs de caractérisation (Jolliet et al. 2003). Un facteur de caractérisation pour une catégorie d'impact est un facteur spécifique à une substance qui permet de convertir le flux élémentaire de cette substance en impact potentiel exprimé dans l'unité de l'indicateur de catégorie (EC JRC-IES 2010a). Ces facteurs de caractérisation reposent sur des mécanismes environnementaux (de cause à effet) qui relient les interventions/actions humaines à des aires de protection, respectivement la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources. On nomme *end-point* l'extrémité finale de la chaîne de cause à effet, et on nomme *mid-point* les étapes intermédiaires du mécanisme environnemental (Jolliet et al. 2003). Il existe différents types d'indicateurs d'impact; (i) les indicateurs d'inventaire qui sont les résultats directs d'ICV, (ii) les indicateurs *mid-point* et *end-point* qui sont évalués à l'aide de modèles de caractérisation.

Les critères utilisés pour analyser la phase d'EICV des études de cas comprennent la méthodologie d'EICV choisie, la liste des catégories d'impact et de dommages sélectionnées, ainsi que l'éventuelle présence d'étapes facultatives, normalisation et pondération. Nous proposons également une comparaison quantitative des résultats d'EICV pour les catégories d'impacts suivantes : consommation d'énergie primaire (CEP) et la contribution au changement climatique (CC).

Description des critères d'analyse des études de cas

Phases de l'ACV	Critères qualitatifs	Critères quantitatifs
Phase 1 - Définition de l'objectif et du périmètre d'étude	<ul style="list-style-type: none"> - Objectif - Frontières du système - Etapes du cycle de vie considérées 	<ul style="list-style-type: none"> - Unité fonctionnelle - Localisation géographique - Nombre d'habitants - Taille de l'échantillon urbain - Durée de vie considérée et période d'analyse
Phase 2 - ICV	<ul style="list-style-type: none"> - Sources des données pour le système de premier plan - Sources des données pour le système d'arrière-plan 	

Phase 3 - EICV	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode d'EICV sélectionnée - Catégories d'impacts et dommages pris en compte - Normalisation (oui/non?) - Pondération (oui/non?) 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommations d'énergie primaire - Impact sur le changement climatique
Phase 4 - interprétation	<ul style="list-style-type: none"> - Monocritère ou multicritère - Analyse de sensibilité 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse de contribution, identification des hotspots

Tableau 1 - Critère d'analyse des études de cas

2.3. RESULTATS

Le processus de sélection nous a permis d'aboutir à un corpus de 14 articles comprenant 21 études de cas. Les éléments clés de leur analyse sont résumés dans le Tableau 2.

2.3.1. Phase 1: Définition de l'objectif et du périmètre d'étude

2.3.1.1. Objectifs des études

Les publications examinées sont divisées en deux grands types d'études que nous proposons de nommer «évaluations de projets d'aménagement à l'échelle du quartier» et «évaluations de la durabilité urbaine ». Les «évaluations de projets urbains à l'échelle du quartier» sont des ACV de projets de développement réels ou de rénovation de quartier qui sont menés soit dans une optique d'aide à la décision, soit dans une optique d'écoconception. Les études relevant de l'aide à la décision sont menées en phase amont de développement de projets urbains et visent à en évaluer les impacts environnementaux afin de définir les orientations majeures du projet. Par exemple Riera Pérez et Rey (Riera Pérez & Rey 2013) ont évalué deux scénarios de densification pour un quartier existant afin d'étudier les dynamiques entre les impacts environnementaux et les réglementations d'urbanisme locales qui déterminent les opportunités de densification. Les études d'écoconception quant à elles visent à évaluer et à comparer plusieurs scénarios en termes de plan masse (Colombert et al. 2011; Cherqui 2005) ou d'autres alternatives de conception en termes de caractéristiques des bâtiments et des espaces publics (Peuportier & Roux 2013; Peuportier et al. 2006; Herfray 2011). En outre, Herfray et al. (Herfray et al. 2011) propose l'ACV de deux éco-quartiers de référence à Freiburg, en Allemagne, afin de déterminer des bonnes pratiques pour l'écoconception. Les «évaluations de la durabilité urbaine» sont des ACV de quartiers existants réels ou de quartiers modèles construits à partir de bâtiments réels (Norman et al. 2006; Davila & Reinhart 2013), et qui visent à étudier certaines dimensions clés de durabilité urbaine et à créer de la connaissance pour alimenter les politiques urbaines. La question de la densité urbaine et de l'étalement urbain est le principal sujet d'intérêt (Riera Pérez & Rey 2013; Norman et al. 2006; Davila & Reinhart 2013; Stephan et al. 2013; Nichols & Kockelman 2014; Li & Wang 2009).

Parmi les documents examinés, seules deux études (Riera Pérez & Rey 2013; Cherqui 2005) ont recours à l'ACV dans le cadre d'évaluations plus complètes de la durabilité urbaine (c.-à-d. abordant les trois piliers du développement durable). Les autres études se concentrent sur les questions environnementales et principalement sur les questions énergétiques. Ainsi 35% des documents traitent uniquement de l'énergie et des GES (Riera Pérez & Rey 2013; Norman et al. 2006; Davila & Reinhart 2013; Stephan et al. 2013; Nichols & Kockelman 2014).

2.3.1.2. Périmètre d'étude et unité fonctionnelle

Les études de cas examinées sont très hétérogènes. L'échelle du quartier n'est pas une échelle bien définie en termes de taille et les études de cas analysent des quartiers de 0,02 km² à 4,42 km². Différents types de quartiers sont représentés. Certains quartiers sont exclusivement résidentiels et comprennent différentes proportions de maisons individuelles et de bâtiments résidentiels collectifs, d'autres

comprennent des bureaux et des magasins (quartiers mixtes). La gamme de densités résidentielles est également très large, avec des densités allant de 370 à 34 400 hab./km². La quasi-totalité des études sont situées dans des pays développés, sauf une en Chine.

Les choix en termes d'unité fonctionnelle (UF) sont également hétérogènes et la plupart du temps, l'UF n'est pas clairement définie. Cinq articles définissent clairement l'UF comme «le quartier» dans son ensemble, avec ses caractéristiques spécifiques et les services qu'il fournit (tels que le nombre de logement et d'emplois) (Colombert et al. 2011; Cherqui 2005; Peuportier et al. 2006; Herfray 2011; Herfray et al. 2011). Par exemple dans Herfray (2011), l'UF est «un quartier comprenant 887 occupants de logements, 734 occupants de bureaux, 432 occupants de commerces et 240 occupants d'écoles, situé en Ile de France, considéré sur une durée de vie de 80 ans ». D'autres études utilisent des UF par habitant ou spatiales. En ce qui concerne les UF par habitant, trois articles définissent l'UF comme «un habitant» (Norman et al. 2006; Stephan et al. 2013; Nichols & Kockelman 2014) et Li & Wang (2009) définissent le l'UF comme «un ménage». Quatre études utilisent des UF spatiales telles que « 1 m² de quartier » (Stephan et al. 2013), « 1 m² de surface habitable par habitant » (Norman et al. 2006), 1 m² d'*Energy reference Area* (càd 1 m² de surface plancher chauffée) (Riera Pérez & Rey 2013) ou « 1 m² de surface plancher » (Davila & Reinhart 2013). (Stephan et al. 2013) et (Norman et al. 2006) quant à eux utilisent les deux types d'UF pour améliorer la comparabilité entre les études de cas ou les scénarios. (Stephan et al. 2013) affirment ainsi que l'utilisation simultanée d'UF spatiales, et d'UF par habitant, et d'UF absolue est très pertinente pour une compréhension complète des effets de la densité urbaine. Par exemple, (Norman et al. 2006) a observé qu'un quartier à faible densité utilisait environ 2 à 2,5 fois plus d'énergie par habitant qu'un quartier à haute densité, mais seulement 1 à 1,5 d'énergie par m² de plancher. En effet, l'utilisation de l'UF spatiale mesure l'intensité de l'utilisation des ressources et l'intensité des impacts environnementaux d'un projet urbain. Alors que l'utilisation des unités par habitant rend compte des différences sociales telles que les différences de tailles de logements, et permet d'évaluer l'efficacité de l'utilisation des ressources et l'intensité des impacts environnementaux de la population.

Éléments clés de l'analyse des études de cas

Références	Pays	Ville	Cas d'étude	Scénarios par cas d'étude	Taille (km ²)	Type de quartier	Nombre d'habitants et d'emplois	Densité résidentielle (hab/km ²)	UF	Frontières du système	Phases du cycle de vie
Stephan et al., 2013	Australie	Melbourne	1	21	1.4	100% résidentiel	700 hab.	500	- 1 km ² de quartier - 1 habitant	- B - EExt (voirie) - R (électricité, eau potable, gas, eaux usées) - M (véhicule individuel, train)	- Cons. - Expl.
Nichols et al., 2014	USA	Austin	4	1	1.7 2.2 1.3	91% résidentiel 71% résidentiel 90% résidentiel	4865 hab. 3394 hab. 4939 hab. 7728 hab.	370 2040 2200 5940	- 1 habitant	- B - EExt (voirie, trottoirs, parkings) - R (eau potable et eaux usées) - M (véhicule individuel, bus)	- Cons. - Expl.
Norman, et al., 2006	Canada	Toronto	2	1	NA	100% résidentiel	NA	27 000 5 700	- 1 habitant - 1 m ² de surface plancher	- B - EExt(voirie) - R (utilités) - M (véhicule individuel, transports publics)	- Cons. - Expl.
Riera-Perez et al., 2013	Suisse	Lausanne	1	4	0.07	97% résidentiel	1029 hab. 28 emplois	14 700	- 1 m ² ERA (Energy Reference Area)	- B - M	- Cons. - Expl. - FdV
Davila and Reinhart, 2013	USA	Cambridge	1	9	NA	100% résidentiel	NA	NA	- 1 m ² de surface plancher	- B	- Cons. - Expl. - FdV
Cherqui, 2005	France	La Rochelle	1	2	0.02	100% résidentiel	650 hab.	32 500	- le quartier	- B	- Cons. - Expl. - FdV
Li and Wang, 2009	Chine	Pékin	1	1	4.42	100% résidentiel	152 000 hab.	34 400	- 1 ménage	- B - M	- Cons. - Expl. - FdV
Trigaux et al., 2014	Belgique	NA	1	4	NA	100% résidentiel	NA	NA	- 1 m ² de surface plancher	- B - EExt (voirie)	- Cons. - Expl. - FdV
Forsberg, 2003	Suède	Hammarby Sjöstad	1	2	NA	100% résidentiel	NA 767 appartements	NA	- 1 habitant	- B - EExt (voirie, parcs) - R (usines de production d'énergie, usines de traitement des eaux usées)	- Cons. - Expl.
Colombert et al., 2011	France	Paris	1	4	0.15	Mixt	NA 36 670m ² de résidentiel 40 000m ² de bureaux 6 500m ² de locaux d'activité 6000m ² de maison de retraite 1 000m ² de magasins 15 000m ² d'équipements publics	NA	- le quartier	- B - OS (roads, parkings, green spaces) - R (water & wastewater, district heating)	- Cons. - Expl. - FdV
Herfray et al., 2011	Allemagne	Freiburg	2	1	0.024 0.039	Mixt 63% résidentiel	394 hab. 125 emplois	16 400 10 100	- le quartier	- B - EExt (voirie, espaces verts) - R (eau potable, eaux usées, réseau de chaleur urbain)	- Cons. - Expl. - FdV
Herfray, 2011 + Peuportier and Roux, 2013	France	Marne La Vallée	3	1	0.095	Mixt 39% résidentiel	887 hab. 734 emplois de bureaux 432 emplois commerçants 240 étudiants	9 340	- le quartier	- B - EExt (voirie, espaces verts) - R (eau potable, eaux usées, réseau de chaleur urbain)	- Cons. - Expl. - FdV
Peuportier et al., 2006	France	Lyon	1	3	NA	Mixt	NA 60 000m ² de résidentiel 15 000m ² de bureaux	NA	- le quartier	- B - EExt (voirie, parkings, espaces verts) - R (eau potable, eaux usées, réseau de chaleur urbain, gestion des déchets)	- Cons. - Expl. - FdV
Trocmé and Lespinoy, 2011	France	Meudon La Forêt	1	3	0.08	Mixt	NA 600 habitations 45 000m ² de bureaux	NA	NA	- B - EExt (voirie, espaces verts) - R (eau potable, eaux usées, réseau de chaleur urbain)	- Cons. - Expl. - FdV

Tableau 2 - Éléments clés de l'analyse des cas d'étude

2.3.1.3. Frontières du système et phases du cycle de vie

La modélisation ACV d'un quartier est complexe. (Popovici 2006) propose par exemple un modèle complet dans lequel le quartier est composé de trois éléments : les bâtiments, les espaces ouverts et les réseaux. Dans ce modèle les phases du cycle de vie sont la phase de construction, comprenant la production des éléments constitutifs du quartier et la construction du quartier, la phase d'utilisation, la phase de rénovation, comprenant la maintenance du quartier et la phase de démolition, comprenant la démolition du quartier et la gestion des déchets de démolition. Dans ce cadre, la mobilité quotidienne est incluse dans la phase d'utilisation du quartier au même niveau que la consommation d'énergie pour le chauffage ou l'utilisation de l'eau. Dans le cadre de notre analyse, nous proposons une adaptation de ce modèle. Pour définir les frontières du système, nous utilisons les quatre champs de l'environnement bâti tels que définis dans la section 2.2.1: bâtiments (B), espaces extérieurs (EExt), réseaux (R), et mobilité (M). En ce qui

concerne les étapes du cycle de vie, nous définissons i) la phase de construction (extraction des matières premières, production des matériaux de construction, construction des bâtiments et des infrastructures), ii) la phase d'exploitation (utilisation et maintenance), et iii) la phase de fin de vie. Pour chaque phase de cycle de vie, il existe des contributeurs à l'échelle du bâtiment et des contributeurs de l'échelle de quartier (càd liés à EExt, R et M). Les phases du cycle de vie du quartier et les principaux processus associés rencontrés dans notre corpus d'études de cas sont résumés dans la Figure 3 adaptée de (Stephan et al. 2013).

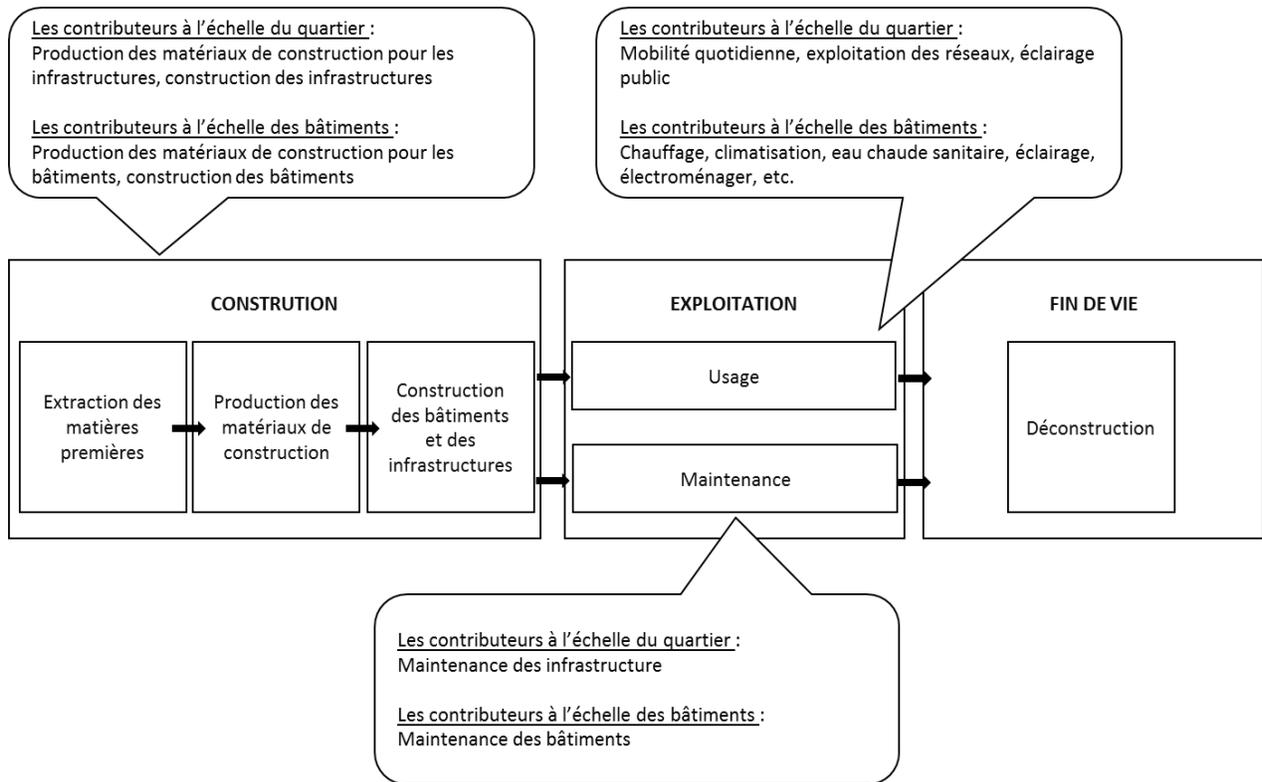


Figure 3 - Etapes du cycle de vie du quartier et contributeurs associés à la fois à l'échelle du bâtiment et à l'échelle du quartier

Frontières du système

Au sein des articles étudiés, on trouve également une grande hétérogénéité dans la sélection des frontières du système qui dépendent toujours des objectifs spécifiques des études. Tout d'abord, les quatre champs de l'environnement bâti ne sont pas pris en compte de la même manière. Seuls quatre articles étudient les quatre champs du système de quartier. Cinq articles portent sur les bâtiments, les espaces extérieurs et les réseaux, deux articles se concentrent sur les bâtiments et la mobilité, un article traite des bâtiments et des espaces extérieurs, enfin deux articles traitent uniquement des bâtiments.

De plus, chaque champ est traité de différentes façons d'une étude à l'autre. Selon les études, différents composants sont pris en compte ou négligés selon le champ de l'environnement bâti : i) différents types de voirie, trottoirs, stationnement et espaces verts pour le domaine des espaces extérieurs, ii) réseaux d'électricité, d'eau, d'eaux usées, de gaz, de chauffage urbain ou de gestion des déchets pour les réseaux et iii) différents moyens de transport pour le domaine de la mobilité (voiture individuelle, train et bus).

Cette hétérogénéité dans la définition du système « quartier » à évaluer est renforcée par un troisième niveau d'hétérogénéité concernant les contributeurs pris en compte pour chaque composant. Les bâtiments présentent le plus grand nombre de contributeurs possibles et ces contributeurs ne sont pas pris en compte de manière homogène. Pour la phase d'exploitation uniquement, l'analyse des bâtiments

peut inclure différents éléments de consommation d'énergie (chauffage / refroidissement, ventilation, eau chaude sanitaire, électricité spécifique, appareils électroménagers, cuisson, etc.), mais aussi d'autres éléments tels que l'utilisation de l'eau ou la production de déchets ménagers.

Il existe néanmoins des choix partagés concernant la sélection des frontières du système. Par exemple, les réseaux sont toujours modélisés comme des "éléments passifs", ce qui signifie que les matériaux constituant le réseau sont les seuls contributeurs pris en compte dans le champ « réseaux ». Ce choix résulte du fait que les consommations liées à ces réseaux (électricité, eau, gaz) sont attribuées aux bâtiments et aux espaces extérieurs. Un autre choix commun réside dans l'exclusion des activités pratiquées par les ménages en dehors du quartier (travail, école, etc.), ainsi que l'exclusion des consommations des ménages qui ne sont pas directement liées aux bâtiments ou à la mobilité quotidienne (ex. nourriture, vêtements, loisirs ou voyages). En effet, ces consommations peuvent être considérées comme comparables pour des ménages semblables, indépendamment du quartier dans lequel ils vivent (Nichols & Kockelman 2014).

Les composants des différents champs de l'environnement bâti et les contributeurs associés qui sont représentés dans notre corpus d'études de cas sont résumés dans le Tableau 3.

Composants du quartier et contributeurs associés				
Champs de l'environnement bâti	Bâtiments	Espaces extérieurs	Réseaux	Mobilité
Composants	- Bâtiments	- Voirie - Trottoirs - Parkings - Espaces verts	- Réseau électrique - Réseau d'eau potable - Réseau d'eaux usées - Réseau de gaz - Réseau de chaleur urbain	- Voiture individuelle - Train - Bus
Contributeurs	- matériaux de construction - déchets de construction - matériaux pour la maintenance - déchets liés à la maintenance - chauffage - climatisation - eau chaude sanitaire - ventilation - électricité spécifique - appareils de cuisson - eau potable - ordures ménagères - eaux usées - déchets de démolition	- matériaux de construction - déchets de construction - matériaux pour la maintenance - déchets liés à la maintenance - éclairage public - eau pour l'entretien des espaces publics - déchets publics - déchets de démolition	- matériaux de construction - déchets de construction - matériaux pour la maintenance - déchets liés à la maintenance - déchets de démolition	- production des véhicules - mobilité quotidienne

Tableau 3 - Composants du quartier et contributeurs associés pour les différents champs de l'environnement bâti

Etapes du cycle de vie

En ce qui concerne les phases du cycle de vie, toutes les études incluent la phase d'exploitation. Soixante-dix pour cent des études tiennent compte des trois phases, c'est-à-dire de la construction, de l'exploitation et de la fin de vie, alors que les 30% restants ne tiennent pas compte de la fin de vie. Cependant, les phases de construction et d'exploitation peuvent être prises en compte de différentes façons. Par exemple (Norman et al. 2006) indiquent que la construction et la maintenance des bâtiments et des infrastructures ne sont pas incluses dans les frontières du système d'étude en raison du manque de données disponibles et de leur faible importance relative sur l'ensemble du cycle de vie global, comme l'ont souligné les études antérieures sur les ACV de bâtiments. (Davila & Reinhart 2013) se concentrent sur l'énergie grise aux

différentes phases du cycle de vie et ne prennent pas en compte les consommations d'énergie liées à l'usage des bâtiments. Par ailleurs, les auteurs négligent également le transport des matériaux et la construction des bâtiments. En ce qui concerne le champ de la mobilité, seule la phase d'usage est comptabilisée dans les études analysées, à l'exception de (Stephan et al. 2013) qui prennent également en compte la fabrication des véhicules.

Les phases du cycle de vie prises en compte pour chaque étude, ainsi que les frontières du système en termes de champs de l'environnement bâti pris en compte sont résumées dans le Tableau 2.

2.3.2. Phase 2: Inventaire du cycle de vie (ICV)

2.3.2.1. Données du système de premier plan

Dans le cadre d'une étude de l'environnement bâti à l'échelle du quartier, les principaux processus de premier plan (càd spécifiques au système étudié) sont; (i) la consommation de matériaux de construction pour les bâtiments, les espaces extérieurs et les réseaux, (ii) les consommations d'énergie et d'eau dans les bâtiments, les réseaux et les espaces extérieurs, et (iii) la mobilité quotidienne. La plupart des études de cas concernent soit des quartiers existants de grandes dimensions (Stephan et al. 2013; Nichols & Kockelman 2014; Li & Wang 2009), soit des projets d'aménagement (Colombert et al. 2011; Cherqui 2005; Peuportier et al. 2006; Herfray 2011; Trocmé & Lépinoy 2011), soit des quartiers modèles (Norman et al. 2006; Davila & Reinhart 2013; Trigaux et al. 2014), ce qui rend difficile voire impossible la collecte systématique de données détaillées et spécifiques au site (par exemple, la composition détaillée de chaque bâtiment ou les données de consommation d'énergie pour chaque bâtiment).

Matériaux de construction

Les quantités de matériaux de construction sont la plupart du temps obtenus par l'analyse directe du plan du quartier ou du plan masse (pour les projets de quartiers en développement). Dans certaines études, les auteurs ont également utilisé les plans détaillés de quelques bâtiments considérés comme typiques ou représentatifs. Dans (Norman et al. 2006; Stephan et al. 2013; Nichols & Kockelman 2014), qui étudient des quartiers existants de grande dimension, les bâtiments sont représentés par quelques bâtiments typiques pour lesquels des données détaillées sont disponibles. Pour des projets de quartier de taille plus limitée, des données spécifiques à chaque bâtiment peuvent être obtenues à partir des plans des bâtiments (selon l'état d'avancement du projet). Néanmoins, l'analyse des plans ne donne accès qu'aux surfaces (m² de plancher) par types de bâtiment. Le choix des matériaux de construction constitue des hypothèses que les auteurs formulent soit conformément à l'efficacité énergétique ciblée pour les bâtiments d'un quartier en développement, soit à partir de données statistiques disponibles pour les quartiers existants. Les matériaux de construction des espaces extérieurs et des réseaux sont également obtenus par l'analyse des plans. On peut noter qu'aucun document ne mentionne de données de premier plan liées aux travaux de construction des bâtiments et aux travaux de génie civil. Dans la plupart des études, les ICV des matériaux de construction ne sont pas disponibles.

Exploitation des bâtiments

En ce qui concerne l'exploitation des bâtiments, deux types de données relatives aux consommations d'énergie sont collectées. D'une part, toutes les études examinées tiennent compte des besoins en énergie thermique, à savoir les consommations d'énergie pour le chauffage ou la climatisation et la production d'eau chaude sanitaire. Pour ces consommations, les sources des données sont systématiquement spécifiées (source ou méthode d'estimation). On distingue d'autre part l'ensemble des autres consommations d'énergie (principalement d'électricité) qui ne sont pas uniformément prises en compte

entre les différentes études de cas et pour lesquelles les sources de données sont plus rarement disponibles.

Les besoins en énergie thermique sont obtenus soit par des enquêtes de terrain (Li & Wang 2009; Forsberg 2003), soit via des données moyennes nationales (Norman et al. 2006), soit dans la plupart des cas grâce à des modélisations. Différentes approches de modélisation sont mises en œuvre. La majorité des études ont recours à la simulation thermique des bâtiments ; (Peuportier et al. 2006; Herfray et al. 2011; Colombert et al. 2011; Cherqui 2005; Trocmé & Lépinoy 2011) utilisent le même outil d'ACV bâtiment appelé EQUER, qui repose sur la simulation thermique dynamique, alors que dans (Stephan et al. 2013; Trigaux et al. 2014) les simulations des besoins thermiques des bâtiments sont basées sur des modèles de transfert de chaleur statiques. D'autres approches de modélisation (hors simulation) sont également utilisées. (Nichols & Kockelman 2014) utilisent un modèle statistique de (Tirumalachetty et al. 2013) qui utilise à la fois des variables climatiques, démographiques et relatives à l'environnement bâti. (Riera Pérez & Rey 2013) calculent des besoins d'énergie normatifs (norme 380/1, société suisse des architectes et des ingénieurs) qui sont ensuite adaptés en fonction de la performance énergétique ciblée.

Mobilité quotidienne

Les besoins de déplacement relatifs à la mobilité quotidienne sont également sourcés de différentes manières. (Norman et al. 2006; Stephan et al. 2013) utilisent respectivement des moyennes régionales et locales. (Riera Pérez & Rey 2013) appliquent une méthode normative (norme 2039, basée sur la société suisse des architectes et ingénieurs) qui pondère la consommation énergétique moyenne suisse pour la mobilité par plusieurs facteurs de correction liés au contexte et aux infrastructures de transport. (Nichols & Kockelman 2014) ont développé des modèles statistiques qui reposent sur la démographie des ménages et les caractéristiques physiques des quartiers pour estimer les besoins de mobilité quotidienne.

Les sources de données pour le système de premier-plan, les quantités de matériaux, les consommations d'énergie et d'eau dans les bâtiments, ainsi que les besoins de déplacement relatifs à la mobilité quotidienne sont présentées en annexe (Annexe 1. Sources des données du système de premier-plan).

2.3.2.2. Données du système d'arrière-plan

Les processus d'arrière-plan sont des processus qui ne sont pas spécifiques au système étudié, comme l'extraction des matières premières, la production des matériaux et produits de construction, ou la production d'eau et d'électricité. Dans les documents examinés peu d'informations sont disponibles concernant les données du système d'arrière-plan et leurs sources.

Pour les matériaux de construction, 66% des documents utilisent des bases de données de type *process-based*. Sept documents utilisent la base de données ecoinvent grâce à l'utilisation d'outils d'ACV bâtiment ou d'ACV quartier tel que EQUER (et sa version à l'échelle du quartier novaEQUER) (Colombert et al. 2011; Cherqui 2005; Peuportier et al. 2006; Herfray 2011; Herfray et al. 2011; Trocmé & Lépinoy 2011) ou Lesosai et Eco-Bat (Riera Pérez & Rey 2013). (Davila & Reinhart 2013) utilisent la base de données ICE (*Inventory of Carbon Emission*) de l'Université de Bath, comme source pour les données d'énergie grise. Deux documents reposent sur des approches *input-output* (IO) pour l'estimation des consommations d'énergie et des émissions de GES liées à la fabrication des matériaux de construction; (Norman et al. 2006) utilisent un modèle de type *economic input-output life-cycle assessment* (EIO-LCA) qui emploie le modèle EIO-LCA des Etats-Unis de 1997 (dernière année disponible), et (Stephan et al. 2013) utilisent une technique d'analyse hybride à base IO développé par (Treloar 1997) avec des coefficients énergétiques propres à l'Australie. Enfin, dans (Nichols & Kockelman 2014), l'énergie grise est estimée pour les matériaux des bâtiments et des infrastructures à partir de la méta-analyse d'un corpus d'ACV détaillées.

En ce qui concerne les vecteurs énergétiques du système d'arrière-plan, les études réalisées à l'aide de l'outil EQUER se fondent sur la base de données ecoinvent. Dans (Riera Pérez & Rey 2013) les facteurs de conversion de l'énergie finale en énergie non renouvelable et potentiel de réchauffement climatique sont tirées de données KBOB LCA (KBOB, 2012), qui est une base de données ACV dédiée aux matériaux et procédés de construction, construite elle aussi à partir de données ecoinvent. Dans (Norman et al. 2006; Davila & Reinhart 2013; Stephan et al. 2013), les facteurs de conversion de l'énergie finale en énergie primaire et émissions de GES proviennent de rapports locaux. (Stephan et al. 2013) tirent spécifiquement les données relatives aux émissions de GES et à l'intensité énergétique des différents modes de transport à partir d'analyse de type *input-output* (Lenzen 1999).

Les sources de données pour le système d'arrière-plan, la production de matériaux, les vecteurs énergétiques et les modes de transport sont présentées en annexe (Annexe 2. Sources de données du système d'arrière-plan).

2.3.3. Phase 3. Evaluation des impacts du cycle de vie (EICV)

Comme expliqué précédemment, dans une ACV les émissions et les consommations de ressources qui peuvent être attribués à un produit ou une activité sont compilées et documentés dans un ICV. Dans l'étape d'EICV, l'ICV est classé et caractérisé afin de calculer des indicateurs d'impact et de dommage.

2.3.3.1. Catégories d'impacts et de dommages

Trente-cinq pour cent des documents examinés se concentrent exclusivement sur la consommation d'énergie primaire et/ou le changement climatique; (Riera Pérez & Rey 2013; Norman et al. 2006; Stephan et al. 2013) évaluent les deux, alors que (Davila & Reinhart 2013; Nichols & Kockelman 2014) évaluent uniquement la consommation d'énergie primaire.

D'autres études portent sur un éventail plus large de catégories d'impact. Dans les études de cas menées avec le logiciel EQUER (Colombert et al. 2011; Cherqui 2005; Peuportier et al. 2006; Herfray 2011; Herfray et al. 2011) les catégories d'impacts et de dommages suivantes sont évalués;

- indicateurs d'inventaire: la demande d'énergie cumulée (GJ), la consommation d'eau (m^3), la production de déchets (t_{eq}), la production de déchets radioactifs (dm^3)
- catégories d'impacts évalués via des indicateurs *mid-point*: le changement climatique ($t_{eq}CO_2$), l'épuisement des ressources abiotiques ($kgSb$ ou adimensionnel), le potentiel d'acidification ($kg_{eq}SO_2$), le potentiel d'eutrophisation ($kg_{eq}PO_4$), l'oxydation (smog estival) ($kg_{eq}C_2H_4$), et les odeurs (Mm^3)
- catégories de dommages (indicateurs *end-point*): la qualité des écosystèmes ($PDF.m^2.an$) et la santé humaine (DALY)

Néanmoins, on note quelques variations comme par exemple la présence d'indicateurs supplémentaires relatifs à l'occupation des sols dans (Colombert et al. 2011; Cherqui 2005) qui reflètent les dommages aux écosystèmes dus à la transformation et à l'occupation des sols.

(Trigaux et al. 2014) ont également opté pour une large gamme de catégories d'impact et de dommages; le changement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, l'acidification des terres et des sources d'eau, l'eutrophisation de l'eau douce et de l'eau de mer, la formation d'oxydants photochimiques, l'épuisement des ressources abiotiques non-fossiles, le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, les ressources fossiles, la toxicité humaine, la formation de particules fines, le rayonnement ionisant, l'écotoxicité, l'occupation des sols.

L'analyse proposée par (Forsberg 2003) est basée sur un outil appelé *Environmental Load Profile* et qui met l'accent sur un nombre plus réduit de catégories d'impacts; l'extraction des ressources non renouvelables, la consommation d'eau, le potentiel de réchauffement climatique, le potentiel d'acidification, le potentiel d'eutrophisation, le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone, les déchets radioactifs et l'utilisation des composés dangereux.

(Li & Wang 2009) évaluent cinq catégories d'impact; le potentiel de réchauffement climatique, le potentiel d'acidification, le potentiel d'eutrophisation, le potentiel de création d'oxydants photochimiques et des déchets solides.

Dans la plupart des études de cas, les méthodes d'EICV employées ne sont pas documentées dans les articles. Dans (Peuportier et al. 2006), les méthodes utilisées; (i) *CML-IA* (Guinee et al. 2001) pour le changement climatique, l'épuisement des ressources abiotiques, le potentiel d'acidification, le potentiel d'eutrophisation, l'oxydation photochimique (smog estival) et les odeurs, (ii) *Eco-Indicator 99* (Goedkoop & Spriensma 2000) pour la qualité des écosystèmes, l'écotoxicité aquatique et la santé humaine, et (iii) *Swiss Ecosarcity* (Frischknecht et al. 2004) pour la demande d'énergie cumulée, la consommation d'eau, la production de déchets, la production de déchets radioactifs. (Herfray 2011) utilise les mêmes méthodes, excepté pour la demande d'énergie cumulée, la production de déchets, la production de déchets radioactifs où il utilise la méthode *CML-IA*. La méthode employée pour la consommation d'eau n'est pas précisée.

Dans (Trigaux et al. 2014), les méthodes d'EICV sélectionnées sont; (i) *ReCiPe Midpoint* (Goedkoop et al. 2009) pour le réchauffement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, l'acidification terrestre et des sources d'eau, et l'écotoxicité, (ii) *ReCiPe Endpoint* pour la toxicité humaine, la formation de particules fines, les rayonnements ionisants, et l'occupation des sols, et (iii) *CML-IA* pour l'eutrophisation, la formation d'oxydants photochimiques, et l'épuisement des ressources abiotiques non fossiles.

Cette analyse de l'étape d'EICV des documents examinés met en évidence plusieurs points. Tout d'abord, 35% des études mettent en œuvre une approche monocritère de l'ACV en se focalisant uniquement sur des critères liés à l'énergie (consommation d'énergie primaire et changement climatique), bien que l'ACV soit par nature une méthode d'évaluation multicritère. De plus, certaines catégories d'impact, comme la qualité de l'air, l'épuisement des ressources minérales ou l'occupation des sols, qui sont des sujets clés du développement urbain durable sont rarement abordés. Enfin, les méthodes d'EICV ne sont pas systématiquement documentées, et les méthodes sélectionnées sont assez anciennes. Seul (Trigaux et al. 2014) mobilise des développements récents, tels que *ReCiPe* ou *ILCD*. Aucune étude, n'utilise de méthodes d'EICV régionalisées.

2.3.3.2. Etapes facultatives; normalisation, pondération

En plus des étapes obligatoires de l'EICV, la norme ISO 14044 (ISO 2006a) mentionne deux étapes facultatives; la normalisation et la pondération. Dans l'étape de normalisation, les différents scores d'impact sont rapportés à une référence commune, par exemple les impacts causés par une personne pendant un an. L'étape de pondération consiste à proposer un classement et/ou une pondération des différentes catégories d'impacts sur l'environnement.

Seuls deux documents procèdent à l'étape de normalisation. Dans (Herfray et al. 2011) les indicateurs d'impact sont normalisés en équivalent personne.an, sur la base de références françaises (ex. 8,7 t_{eq}CO₂ d'émissions par personne et par an). Les résultats de (Li & Wang 2009) sont quant à eux normalisés sur la base des valeurs moyennes pour la ville de Pékin.

Deux documents procèdent à l'étape de pondération. (Li & Wang 2009) appliquent des facteurs de pondération aux cinq catégories d'impact évaluées, sans toutefois discuter le choix des facteurs de pondération. (Trigaux et al. 2014) proposent une pondération basée sur une évaluation monétaire. Les valeurs d'impact pour chaque indicateur environnemental individuel sont regroupées au moyen de la méthode des coûts environnementaux. Pour chaque indicateur environnemental individuel, les valeurs d'impact sont multipliées par un facteur de monétisation (par exemple: $X \text{ kg}_{\text{eq}}\text{CO}_2 * Y \text{ €} / \text{kg}_{\text{eq}}\text{CO}_2$) de façon à obtenir un score unique.

2.3.3.3. Résultats d'EICV

En raison de la diversité des études de cas (en termes de typologie de quartiers) et de la variété des unités fonctionnelles utilisées, il n'est pas immédiat de fournir un résumé des résultats d'EICV dans un format permettant une comparaison entre les études de cas. Chaque fois que cela était possible avec les données disponibles, nous avons calculé les indicateurs de consommation d'énergie primaire (CEP) et de changement climatique (CC) pour l'ensemble du quartier étudié, ainsi que par habitant, par m² de surface plancher et par m² de quartier. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 4 pour les études de cas résidentielles (ou principalement résidentielles) (partie supérieure du tableau) et pour les études de cas mixtes (partie inférieure du tableau).

Résultats d'EICV – consommation d'énergie primaire (CEP) et changement climatique (CC)

Référence	Localisation	Cas d'étude	Taille (km ²)	Densité résidentielle (hab./km ²)	Frontières	Phases du cycle de vie	Durée d'analyse	Type de quartier	UF quartier.an		UF habitant.an		UF m ² (quartier).an		UF m ² (surface plancher).an		
									CEP TJ	CC kteqCO2	CEP GJ	CC teqCO2	CEP MJ	CC kgeqCO2	CEP MJ	CC kgeqCO2	
Stephan et al., 2013	Melbourne (Australie)	1	1,5	500	- B - EExt - R - M	- Cons. - Expl.	100	100% résidentiel	73,0	5,4	104,3	7,8	48,7	3,6	1664,8	123,8	
Nichols et al., 2014	Austin (USA)	4	13.1	370	- B			91%résidentiel	559,5		115,0		42,7				
			1.7	2040	- EExt	- Cons.	NA	91%résidentiel	373,3		110,0		219,6				
			2,2	2200	- R	- Expl.		71%résidentiel	479,1		97,0		217,8				
			1,3	5940	- M			90%résidentiel	556,4		72,0		428,0				
Norman, et al., 2006	Toronto (Canada)	2	NA	27000	- B - EExt	- Cons.	50	100% résidentiel			40,1	3,3			936,4	77,7	
			NA	5700	- R - M	- Expl.				86,0	8,6			1068,0	107,3		
Forsberg, 2003	Hammarby Sjöstad (Suède)	1	NA	NA	- B - EExt - R - M	- Cons. - Expl.	NA	100% résidentiel				2,8					
Riera-Perez et al., 2013	Lausanne (Suisse)	1	0,07	14700	- B - M	- Cons. - Expl. - FdV	60	97% résidentiel	71,9	4,1	69,8	4,0	1026,5	59,2	1216,8	70,2	
Davila and Reinhart, 2013	Cambridge (USA)	1	NA	NA	- B	- Cons. - Expl. - FdV	100	100% résidentiel							531,7		
Cherqui, 2005	La Rochelle (France)	1	0,02	32 500	- B	- Cons. - Expl. - FdV	80	100% résidentiel	8,6	0,4	13,2	0,6	427,5	19,4	438,5	19,9	
Colombert et al., 2011	Paris (France)	1	0,15	NA	- B - EExt - R	- Cons. - Expl. - FdV	80	Mixt 36 670m ² résidentiel 40 000m ² bureaux 6 500m ² activités 1 000m ² magasins 15 000m ² équip.	103,4	2,3			689,1	15,3	1159,2	25,8	
Herfray et al., 2011	Freiburg (Allemagne)	2	0,024	16 400	- B - EExt	- Cons. - Expl.	80	Mixt 63% résidents 20% employés 17% étudiants	5,7	0,4	14,4	1,1	236,8	17,6			
			0,039	10 100	- R	- FdV			0,0	0,5	0,0	1,2	0,0	12,5			
Herfray, 2011 (+ Peuportier and Roux, 2013)	Marne La Vallée (France)	1	0,095	9 340	- B - EExt	- Cons. - Expl.	80	Mixt 39% résidents 51% employés 10% sétudiants	15,1		17,0		158,0		281,3		
											21,0		550,8		346,9		
Peuportier et al., 2006	Lyon (France)	1	NA	NA	- B - EExt - R	- Cons. - Expl. - FdV	80	Mixt 60 000m ² résidentiel 15 000m ² bureaux	5,0		5,7		140,1		74,0		
									63,0	0,8			840,0	10,8			

Tableau 4 - Résultats d'EICV, consommation d'énergie primaire (CEP) et changement climatique (CC)

Dans le cadre de l'interprétation de ces résultats, il faut garder à l'esprit que les frontières du système d'étude ainsi que la durée d'analyse varient selon les études de cas. Lorsque l'on considère l'ensemble de l'échantillon pour lesquels les résultats d'EICV sont disponibles, la consommation d'énergie primaire varie de 0 à 115 GJ/hab./an, avec une valeur médiane de 55 GJ/hab./an (échantillon constitué de 14 valeurs). Et les émissions de GES varient de 0,6 à 8,6 t_{eq}CO₂/hab./an avec une valeur médiane de 3,1 t_{eq}CO₂/hab./an (échantillon de 8 valeurs). L'hétérogénéité des cas d'étude et de leurs modélisations conduit à des résultats couvrant trois ordres de grandeur pour la consommation d'énergie primaire et deux ordres de grandeur pour le changement climatique (exprimé par habitant et par an).

Ces résultats, ainsi que la consommation d'énergie primaire et les émissions de GES exprimés par unité spatiale (/m² de surface plancher/an) sont présentés dans la Figure 4 pour l'ensemble de l'échantillon d'études de cas.

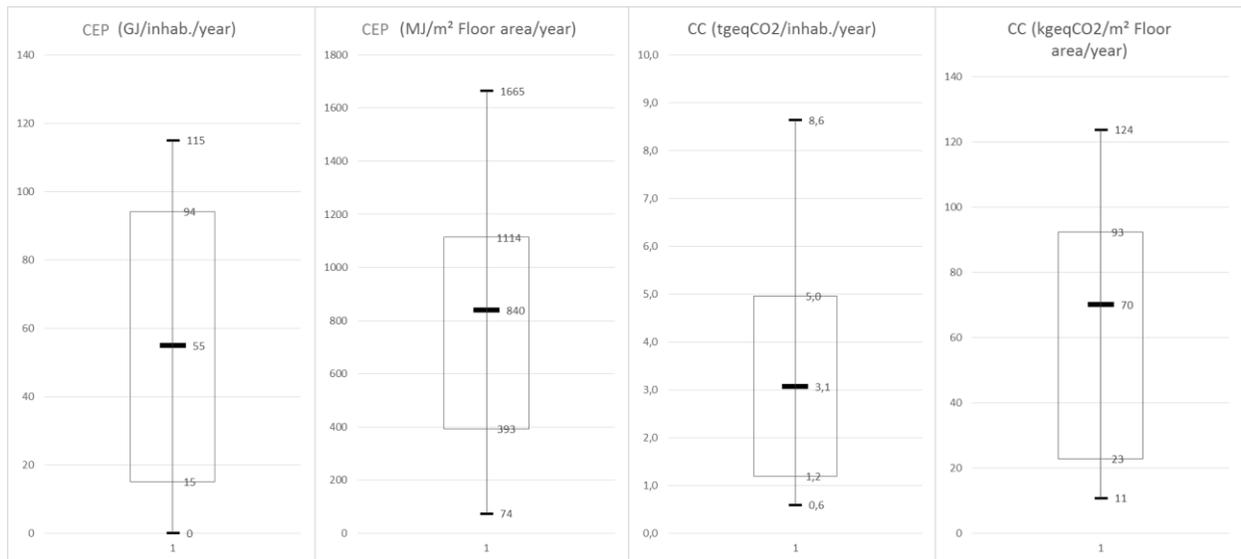


Figure 4 - Consommation d'énergie primaire (CEP) et changement climatique (CC); min, Q1, médiane, Q3, et max

Sept études de cas résidentielles tirées de 3 articles (Norman et al. 2006; Stephan et al. 2013; Nichols & Kockelman 2014) sont comparables, car utilisant les mêmes frontières du système en termes de phases du cycle de vie (Cons., Expl., FdV) et de champs de l'environnement bâti (B., Eext., R. et M.). Pour ces études de cas la consommation d'énergie primaire varie de 40 à 115 GJ/hab./an avec une valeur moyenne de 89 GJ/hab./an (échantillon constitué de 7 valeurs). Et les émissions de GES varient de 3,3 à 8,6 t_{eq}CO₂/hab./an avec une valeur moyenne de 6,6 t_{eq}CO₂/hab./an (échantillon composé de 3 valeurs). Cependant les durées d'analyse utilisées sont très différentes; 100 ans (Stephan et al. 2013), 50 ans (Norman et al. 2006), et non communiquées dans (Nichols & Kockelman 2014).

Dans le cas des quartiers mixtes, 7 études de cas provenant de 4 documents (Colombert et al. 2011; Peupartier et al. 2006; Herfray 2011; Herfray et al. 2011) analysent les mêmes étapes du cycle de vie (Cons., Expl., FdV.), les mêmes champs de l'environnement bâti (B., Eext., et R.), et utilisent la même durée d'analyse (80 ans). Pour ces études de cas, la consommation d'énergie primaire varie de 0 à 21 GJ/hab./an avec une valeur médiane de 12 GJ/hab./an (échantillon en 5 valeurs).

2.3.4. Phase 4 : Interprétation

2.3.4.1. Analyse de contribution

Neuf études proposent une analyse de contribution soit entre les différents champs de l'environnement bâti (B., Eext., R. et M.), soit entre les phases du cycle de vie (Cons., Expl., FdV). Compte tenu de l'hétérogénéité dans le choix des frontières du système, ainsi que dans la présentation des résultats, il n'est pas possible de synthétiser ces analyses de contribution d'une manière cohérente et d'en tirer des conclusions générales. A des fins illustratives nous proposons ci-dessous un bref résumé des analyses de contributions les plus poussées proposées par les documents examinés.

(Stephan et al. 2013) montrent que les consommations d'énergie liées à l'usage du quartier constituent le principal contributeur à l'ensemble du cycle de vie et représentent 39,4% de la consommation d'énergie primaire (CEP) et 42,4% des émissions de GES. Le deuxième contributeur est la mobilité qui représente 33,6% de la CEP et 36% des émissions de GES, suivi de l'énergie grise à hauteur de 26,0% de la CEP et 21,6% des émissions de GES. En ce qui concerne l'énergie grise, il est à noter que dans cette étude, l'énergie grise liée aux infrastructures de transport (routes) est incluse dans le contributeur « Mobilité ». Cette étude souligne également la contribution importante des infrastructures (routes et réseaux) à l'énergie grise du quartier sur l'ensemble de son cycle de vie (16,9%) et souligne la faible contribution des travaux de construction (bâtiments et infrastructures) qui ne représentent que 1,3% de l'énergie grise (0,03% de la CEP sur l'ensemble du cycle de vie).

En moyenne pour les quatre quartiers étudiés par (Nichols & Kockelman 2014), les bâtiments contribuent à hauteur de 53% de la CEP, la mobilité (phases de construction et d'exploitation des infrastructures de transport) représente 45,5% de la CEP. Les infrastructures hors transport (eau potable, eaux usées et éclairage) ne représentent que 1% de la CEP.

Dans le cadre d'une comparaison de quartiers résidentiels de différentes densités, Norman et al. (2006) concluent que la mobilité contribue de manière plus significative à la CEP et aux émissions de GES dans les contextes urbains de faible densité, et qu'à contrario, les impacts liés à la phase d'usage des bâtiments sont plus importants dans les contextes à haute densité urbaine. Les auteurs montrent également que la production des matériaux de construction représente environ 10% de la CEP et des émissions de GES. Sur une base par habitant, ils ont constaté que la majorité des émissions de GES dans les deux cas (faible et haute densité) résultent de la mobilité alors que la majorité de la consommation d'énergie primaire provient de l'usage des bâtiments.

Dans le cadre d'une comparaison de quatre scénarios basés sur différents types de bâtiments résidentiels, Trigaux et al. (Trigaux et al. 2014) montrent que la voirie ne contribue qu'à hauteur de 1 à 6% à l'impact total (bâtiments et voirie).

Dans le cadre de l'étude de deux quartiers à basse consommation d'énergie, se concentrant sur les bâtiments, les espaces extérieurs et les réseaux (Herfray et al. 2011) et (Herfray 2011) ont montré qu'en termes de CEP, la phase de construction contribue à hauteur de 7% et 13,5% pour les deux cas d'étude. La phase d'exploitation contribue à hauteur de 92% et 85%, et la phase de fin de vie contribue à hauteur de 1% et 1,5%. Ici encore, nous voyons la prépondérance de la phase d'exploitation et de l'insignifiance relative de la phase de fin de vie. Par ailleurs (Herfray et al. 2011) proposent également l'analyse d'un quartier à énergie positive, et les résultats sont évidemment très différents; la phase de construction contribue à hauteur de 41,5% de la CEP ce qui est comparable à la contribution de la phase d'exploitation

(53,5%). Il convient également de noter que par rapport aux quartiers à basse consommation d'énergie, la contribution accrue de la phase de construction du quartier à énergie positive est à la fois une augmentation relative et absolue. En ce qui concerne la phase de fin de vie, il s'agit seulement d'une augmentation relative.

(Cherqui 2005) a procédé à une analyse de contribution des différentes phases du cycle de vie pour 11 catégories d'impact. Cette analyse met également en évidence la prédominance de la phase d'exploitation et l'insignifiance relative de la phase de fin de vie pour l'ensemble des catégories d'impact, à l'exception de la production de déchets dont la phase de fin de vie est le principal contributeur.

De même que dans le cadre des revues critiques sur l'ACV bâtiment (Ortiz et al. 2009; Buyle et al. 2012; Cabeza et al. 2014), il n'est pas non plus possible dans le cadre de cette revue critique sur l'ACV quartier d'extraire des résultats généraux à caractère universel, parce que les quartiers qui ont été étudiés sont très différents en termes la taille, de densité, de localisation, etc., mais également en raison de la grande hétérogénéité dans les choix méthodologiques (ex. les frontières du système, la durée d'analyse). Néanmoins, certaines tendances peuvent être identifiées à partir des analyses de contribution mentionnées ci-dessus:

- en termes de champs de l'environnement bâti, les bâtiments, suivi de la mobilité sont les principaux contributeurs, à la consommation d'énergie primaire et aux émissions de GES
- les contributions à la CEP at aux émissions de GES de l'exploitation des bâtiments, de l'énergie grise des bâtiments et infrastructures, et de la mobilité peuvent être du même ordre de grandeur
- la prédominance de la phase d'exploitation
- l'importance de la phase de construction qui peut être du même ordre de grandeur que la phase d'exploitation pour des quartiers à basse consommation d'énergie
- la faible contribution de la phase de fin de vie à l'exception de l'indicateur « production de déchets »

2.3.4.2. Analyse de sensibilité

Seuls deux articles traitent directement des questions d'incertitude en proposant une analyse de sensibilité. Dans (Stephan et al. 2013) les incertitudes et la variabilité des données sont prises en compte par une analyse par intervalles. Cette technique permet de spécifier une valeur nominale et une plage dans laquelle le résultat réel doit se situer. Les auteurs fixent l'incertitude sur les données relatives à l'énergie grise à $\pm 20\%$ et $\pm 50\%$ respectivement pour les données de type *process-based* et *input-output*. La variabilité des consommations d'énergie en phase d'usage est fixée à $\pm 20\%$. Selon cette analyse par intervalles, les part de l'énergie grise, des consommations d'énergie en phase d'usage, et des consommations d'énergie liées à la mobilité sont respectivement comprises dans les plages suivantes ; [15,3%, 39,4%], [28,7%, 52,5%] et [23,9%, 46%]. Les incertitudes associées sont respectivement de $\pm 47\%$, $\pm 29\%$ et $\pm 32\%$.

Dans (Nichols & Kockelman 2014) les auteurs calculent des élasticités pour évaluer la réponse de la consommation d'énergie primaire à des changements relatifs à l'environnement bâti ou aux comportements des habitants. Ces élasticités rendent compte de la sensibilité relative de la consommation d'énergie primaire à des variables spécifiques différentes. Parmi un large éventail de variables, les élasticités les plus importantes correspondent aux variations de la taille moyenne des logements, de la densité résidentielle, et du pourcentage de maisons individuelles.

En plus des analyses de sensibilité mentionnées ci-dessus, l'évaluation de scénarios (réalisée dans 7 études de cas) peut également être considérée comme une analyse de sensibilité. Il s'agit alors de comparer pour chaque catégorie d'impact, les résultats obtenus pour des scénarios alternatifs à ceux obtenus pour un scénario de base. Dans le cadre de cette revue critique, nous n'avons pas collecté les résultats d'EICV relatifs aux scénarios alternatifs.

2.4. DEFIS METHODOLOGIQUES ET BESOINS DE RECHERCHE

2.4.1. Multifonctionnalité du système et définition de l'unité fonctionnelle

En raison de l'hétérogénéité, de la complexité et de la multifonctionnalité des quartiers, il apparaît difficile de définir une unité fonctionnelle (UF) unique pour comparer des quartiers ou des scénarios alternatifs pour un même quartier. (Herfray et al. 2011) rappellent que la définition de l'UF dépend de l'objectif de l'étude, mais insiste également sur le fait que certains aspects communs doivent systématiquement être inclus dans la définition de l'UF, et ce afin d'améliorer la comparabilité des ACV; les fonctions du quartier (résidentiel, tertiaire, commercial, loisirs, etc.), certaines données quantitatives (surfaces de logement, de bureaux, de commerces, d'espace public, nombre d'habitants, nombre d'emplois, etc.), des critères qualitatifs relatifs aux fonctions du quartier (qualité thermique, visuelle, confort acoustique, qualité de vie, etc.), et la durée d'analyse.

(Herfray 2011) dont l'objectif est de comparer différents quartiers, passe par une étape d'adaptation des différents scénarios de développement pour améliorer la comparabilité des résultats d'évaluation. Dans cette comparaison d'un quartier réel avec deux quartiers de référence, l'auteur propose une unité fonctionnelle très détaillée; «Un quartier comprenant 887 occupants de logements, 734 occupants de bureaux, 432 occupants de commerces et 240 occupants d'écoles, situé en Ile de France, considéré sur une durée de vie de 80 ans». Il propose également une méthodologie permettant d'adapter les quartiers de référence afin qu'ils correspondent à cette même UF définie pour le quartier réel. Il s'agit principalement de modifier les proportions d'usager du quartier pour chaque fonction, et ce sans modifier les densités initiales.

Cette idée d'une UF « multidimensionnelle » est développée par (Loiseau 2014) à l'échelle du territoire. L'auteur propose en effet une adaptation du cadre de l'ACV à l'évaluation environnementale de l'aménagement du territoire. Comme dans le cas des quartiers, l'auteur identifie la multifonctionnalité du territoire comme un point dur pour l'application de l'ACV à son évaluation environnementale en rendant problématique la de définition de l'unité fonctionnelle. Une nouvelle approche de l'UF et du flux de référence est proposée afin de contourner reposant sur l'inversion des étapes de définition de l'UF. Dans l'ACV classique, l'unité fonctionnelle est une quantification de la fonction d'un produit ou d'un service sur la base de laquelle sont calculés les impacts. L'unité fonctionnelle permet par la suite de déterminer le flux de référence pour chaque scénario étudié. CE flux estime la quantité de produits (ou services) nécessaire permettant de remplir la même fonction au sein de chaque scénario. L'approche proposée par (Loiseau 2014) consiste au contraire à partir du flux de référence, déterminé par le couple formé par un « territoire », délimité par ses frontières géographiques, et un scénario d'aménagement associé. Une fois le flux de référence sélectionné, il est nécessaire de définir puis d'évaluer les fonctions et les services rendus associés à ce flux en parallèle de l'évaluation des impacts du cycle de vie. Par conséquent deux types d'indicateurs sont déterminés en utilisant cette approche, (i) un vecteur des impacts environnementaux (correspondant à la phase d'EICV d'une ACV traditionnelle), et (ii) un vecteur de fonctions remplies par le territoire (différentes occupations des sols) pour les différentes partie-prenantes

du territoire. Cette permutation dans les étapes de définition de l'UF conduit à une adaptation profonde du cadre méthodologique de l'ACV à l'étude de systèmes territoriaux. L'évaluation des fonctions d'un territoire est désormais un résultat de l'ACV et non plus un paramètre d'entrée. Nous croyons qu'une adaptation de cette approche de l'ACV de quartier devrait être plus systématiquement étudiée et développée, en tenant compte de fonctions telles que: la fourniture de logement, la fourniture de l'emploi, l'accessibilité aux services quotidiens, la mobilité, la qualité de vie, etc.

Une autre approche permettant de surmonter partiellement la difficulté à définir une UF unique et permettant d'améliorer la comparabilité entre les études de cas consistent à combiner l'utilisation de trois types d'UF : absolue (le quartier dans son ensemble), spatiale (par m² de plancher par exemple), et par habitant (Norman et al. 2006; Stephan et al. 2013; Nichols & Kockelman 2014).

2.4.2. Contextualisation

La contextualisation de l'ACV d'un quartier constitue un autre défi majeur pour fournir aux décideurs une analyse utile, que ce soit pour la conception d'un projet de développement de quartier ou pour l'élaboration des politiques urbaines. Le manque de prise en compte de la situation particulière d'un quartier est une des limitations clairement identifiées de l'ACV, mais c'est également le cas pour la plupart des approches existantes en matière d'évaluation de la durabilité à l'échelle du quartier (Riera Pérez & Rey 2013). En effet, un quartier, contrairement à un produit industriel par exemple, est par nature un système extrêmement dépendant de son contexte. Il est intégré dans un environnement spécifique, est soumis à un climat spécifique, interagit avec une technosphère spécifique, accueille des usagers avec des comportements en partie culturellement déterminés, et peut être confronté à des problématiques environnementales locales (en plus des problèmes environnementaux globaux). Ainsi, la nécessité d'une contextualisation de l'analyse se manifeste à plusieurs niveaux dans les deux phases d'ICV et d'EICV.

La contextualisation dans la phase d'ICV nécessite d'utiliser autant que possible des données spécifiques au site pour les processus du système de premier plan ainsi que pour ceux du système d'arrière-plan. Comme indiqué précédemment, un des contributeurs majeurs aux impacts du cycle de vie d'un quartier sont les consommations d'énergie des bâtiments en phase d'exploitation. Or, ces consommations peuvent être très largement influencées par l'environnement urbain des bâtiments. (Srebric et al. 2015) proposent une revue des propriétés d'un quartier qui influencent les consommations d'énergie et les débits d'air. Les auteurs insistent sur le fait que les schémas de consommations d'énergie dépendent fortement du contexte urbain. Par exemple (Gracik et al. 2015) ont montré que les variations dans le climat local et flux d'air autour des bâtiments peuvent conduire à une réduction de 17% de la performance des climatiseurs dans un contexte urbain (par rapport à un contexte rural). Dans les articles examinés différentes approches sont proposées pour évaluer les consommations d'énergie des bâtiments. Ces approches peuvent être divisées en deux catégories; (i) l'utilisation des données statistiques et, (ii) le recours à la simulation thermique (statique ou dynamique) à l'échelle du bâtiment. Les deux approches ont leurs avantages et leurs inconvénients. La simulation thermique à l'échelle du bâtiment permet la contextualisation de l'évaluation des consommations énergétiques des bâtiments par la prise en compte du climat local (irradiation, vent), ainsi que des interactions entre les bâtiments et l'environnement (par exemple par le biais des phénomènes d'ombrage ou de réflexion solaire). Néanmoins, ce type d'analyse nécessite des ressources importantes (temps) et des données qui ne sont pas toujours disponibles en phases amont d'un projet d'aménagement, par exemple sur les bâtiments. Les données statistiques sont quant à elles plus facilement disponibles mais ne permettent pas d'éclaircir le processus de conception, notamment en ce qui concerne les thématiques énergétiques.

Ainsi, dans le domaine de l'aide à la décision pour l'aménagement urbain, il y a un besoin clair de développement d'approches qui permettraient la contextualisation de l'évaluation des consommations d'énergie des bâtiments tout en restant compatibles avec la disponibilité des données en phase amont de conception d'un projet d'aménagement. Ces approches devraient idéalement prendre en compte l'influence des leviers de conception relatifs à l'établissement du plan masse d'une opération d'aménagement, tels que la morphologie urbaine (trame viaire et gabarits des bâtiments), le choix des matériaux de surface ou les choix en termes de végétalisation. Elles devraient permettre d'évaluer un plan masse sur des problématiques telles que la valorisation des apports solaires pour les bâtiments ou l'effet îlot de chaleur urbain (ICU). Ces évaluations devraient être réalisées à l'échelle du quartier et non pas à l'échelle des bâtiments pris individuellement, et pour lesquels les données ne sont pas encore disponibles. Une piste de recherche consiste à étudier les corrélations possibles entre les besoins d'énergie des bâtiments et des indicateurs simples évalués à l'échelle du quartier. Dans une analyse des indicateurs d'évaluation du potentiel solaire d'un quartier en phase amont de conception, (Nault et al. 2015) examinent la possibilité d'utiliser des indicateurs de compacité et de niveau d'exposition solaire peuvent être utilisés comme indicateurs de performance lorsqu'ils sont évalués à l'échelle du quartier. (Srebric et al. 2015) pointent également des paramètres liés à la morphologie urbaine, tels que la densité urbaine, la densité de façade, la hauteur moyenne des bâtiments, comme des paramètres sur lesquels pourraient être construits des modèles d'évaluation des besoins énergétiques à l'échelle du quartier.

La contextualisation dans la phase d'EICV consiste à définir quels sont les mécanismes environnementaux pertinents dans le contexte local d'un quartier. Un certain nombre de mécanismes environnementaux ont un périmètre mondial, tandis que d'autres ont un périmètre régional (Goedkoop et al. 2009). Cela signifie qu'un mécanisme environnemental donné peut avoir des impacts importants dans certaines régions, mais peu d'impacts dans d'autres. Cela peut être pris en compte par l'utilisation de méthodes d'EICV régionalisées. Plusieurs catégories d'impacts locaux et régionaux sont actuellement en cours de contextualisation: par exemple la diminution des ressources en eau (Kounina et al. 2012), l'eutrophisation (Azevedo et al. 2013), l'occupation des sols (Koellner et al. 2013). Cependant, la plupart des méthodes ne sont pas encore opérationnelles et des développements supplémentaires devront être entrepris pour les inclure dans les ACV de quartiers. D'autres catégories d'impact, telles que celles liées à la qualité de l'air et qui sont particulièrement pertinentes dans le cadre d'évaluation des impacts liés à la mobilité appellent de nouveaux développements en termes de régionalisation. Enfin, on recense un besoin d'outils de couplage entre systèmes d'information géographique (SIG) et ACV, qui permettraient la contextualisation à échelle locale des ACV de quartiers.

2.4.3. Les aspects temporels

L'application de l'ACV à l'évaluation environnementale de quartiers soulève également des problématiques liées à la gestion des aspects temporels.

Une première problématique est celle du choix de la durée du cycle de vie. Un quartier se développe souvent au fil des décennies et ses composants ont des durées de vie très longues, lesquelles ne peuvent être anticipées avec précision. De plus, les bâtiments par exemple sont susceptibles de subir des rénovations ou des changements d'usage au cours de leur vie. Il est donc difficile pour un quartier de justifier la pertinence du choix d'une durée de vie et une durée d'analyse. Le même problème se pose quant au choix des durées de vie spécifiques des composants du quartier, ainsi que des fréquences et scénarios de maintenance/entretien de ces composants. Il n'y a pas de consensus à l'heure actuelle dans le choix de la durée d'analyse et les études de cas examinées utilisent des durées de vie allant de 50 à 100

ans. Enfin sur des périodes aussi longues, les technologies sont susceptibles d'évoluer ce qui peut modifier les impacts du quartier.

Une deuxième problématique relative à la gestion des aspects temporels en ACV est la prise en compte du comportement dynamique de certains processus de premier plan et d'arrière-plan. S'agissant des processus de premier plan nous avons déjà évoqué par exemple l'utilisation de la simulation thermique dynamique pour évaluer les consommations énergétiques des bâtiments. S'agissant des processus d'arrière-plan des développements sont notamment en cours afin de tenir compte de l'évolution temporelle du mix de production d'électricité (Herfray 2011). Cette prise en compte de la dynamique temporelle du mix électrique améliore la précision de l'évaluation et est particulièrement pertinente pour quartiers à basse consommation. (Peuportier & Roux 2013) rapportent que l'application d'un modèle dynamique pour le mix électrique peut conduire à des différences de 30% par rapport à la pratique courante de l'ACV considérant une moyenne annuelle du mix de production d'électricité. Ce type de modélisation permet entre autre: l'étude de la stratégies de modulation de la demande en fonction des variations temporelles des impacts, l'étude du *trade-off* entre l'augmentation des apports solaires pour le chauffage passif en hiver et les besoins de refroidissement en été avec l'objectif de minimiser les impacts annuels, l'amélioration des processus de prise de décision pour la production d'électricité renouvelables sur site (Peuportier & Roux 2013).

Le modèle d'ACV dynamique développé par (Herfray 2011) représente l'évolution temporelle du mix électrique en évaluant au pas de temps horaire à la fois le mix électrique et les impacts associés aux différents usages de l'électricité (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, ...), tout en intégrant la production locale d'énergie renouvelable. Ce modèle permet à l'auteur de comparer l'ACV attributionnelle et l'ACV conséquentielle. Dans la méthodologie attributionnelle, chaque consommation d'énergie à l'instant t est associée au mix électrique national à l'instant t. Dans l'approche conséquentielle, chaque consommation d'énergie à l'instant t est associée au mix électrique induit par cette consommation particulière d'énergie à l'instant t. Les résultats sur un quartier à énergie positive montrent une réduction de 20% de la demande d'énergie sur le cycle de vie évaluée par l'approche conséquentielle par rapport à l'évaluation réalisée par l'approche attributionnelle.

2.5. PRINCIPAUX OUTILS EXISTANTS POUR L'ACV DE QUARTIERS

Dans cette section, nous présentons les outils existants pour l'ACV de quartier que nous avons rencontrés dans le cadre de l'analyse de notre corpus de cas d'étude. NovaEQUER (ou sa version antérieure EQUER) a été utilisé dans les études de cas suivantes ; (Colombert et al. 2011; Cherqui 2005; Peuportier et al. 2006; Herfray 2011; Herfray et al. 2011; Trocmé & Lépinoy 2011). Umi a été utilisé par (Davila & Reinhart 2013). SméO a été utilisé par (Riera Pérez & Rey 2013). Enfin l'outil SOLEN, même s'il n'a pas été le support d'une des études cas analysées nous est apparu au cœur de notre thématique lors de nos recherches bibliographiques.

Nous proposons également une présentation du logiciel NEST développé par NOBATEK/INEF4 (Yepez-Salmon 2011). Pour chaque outil, nous détaillons notamment les indicateurs évalués, le mode de calcul des quantités de matériaux de construction pour les bâtiments, et le mode d'évaluation des consommations d'énergie pour le chauffage et la climatisation.

2.5.1. NovaEQUER

NovaEQUER (IZUBA-Energies & Mines-Paristech n.d.) est un logiciel d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) à l'échelle « bâtiment » et « quartier » ayant pour but d'aider les acteurs de la construction (urbanistes/architectes, maîtrise d'ouvrage, BET, etc.) à mieux cerner les conséquences de leurs choix en matière d'écoconception. Le moteur de calcul du logiciel, aujourd'hui développé et édité par IZUBA-Energies, a été réalisé à partir des travaux du Centre d'Efficacité Energétique des Systèmes de l'école des Mines de Paris. NovaEQUER se base sur une suite logicielle composée de 3 modules édités par IZUBA-Energies (Figure 5) qui permettent successivement de modéliser en trois dimensions les bâtiments (ALCYONE), déterminer leurs besoins énergétiques par simulation thermique dynamique (PLEIADES+COMFIE) et de calculer leurs impacts environnementaux (NovaEQUER). Les éléments additionnels compris dans le périmètre de l'espace public sont ensuite pris en compte dans NovaEQUER.

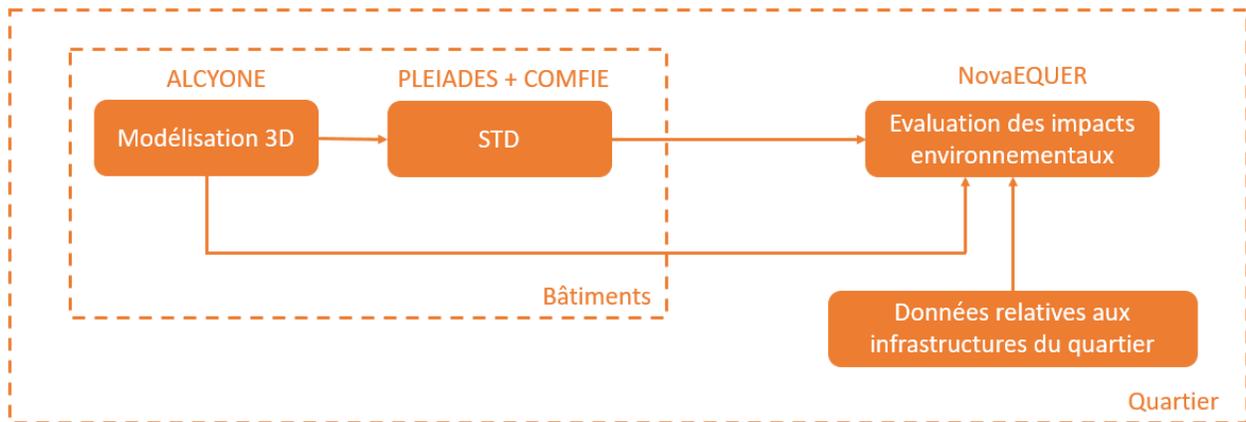


Figure 5 – Intégration de NovaEQUER dans la suite logicielle IZUBA-Energies

NovaEQUER met à disposition une bibliothèque qui s'appuie sur la base de données ecoinvent. Chaque matériau de construction spécifié par l'utilisateur dans PLEIADES+COMFIE est associé à son équivalent ecoinvent. Les besoins thermiques, évalués par STD sont utilisées pour permettre le calcul des impacts environnementaux de chaque bâtiment en fonction du type d'énergie choisi. La prise en compte d'éléments complémentaires comme le transport des occupants, la gestion de l'eau et des déchets sont aussi possibles. En outre, les descriptions des infrastructures (réseaux d'eau potable et usées, réseau de chaleur), de l'usage du sol (espaces verts ou voiries), de l'éclairage public et des moyens de transports disponibles, permettent de compléter l'analyse environnementale de l'ensemble du quartier.

NovaEQUER propose l'évaluation de 12 catégories d'impacts environnementaux se basant sur la norme XP01-020-3 issue de la norme ISO 14040. Les indicateurs utilisés pour couvrir ces catégories d'impacts sont présentés dans le Tableau 5.

Impacts environnementaux	Indicateurs	Unités	Méthode de calcul
Consommation de ressources énergétiques	Energie primaire consommée	GJ	Indicateurs se basant sur la norme XP01-020-3 issue de la norme ISO 14040
Consommation d'eau totale	Volume d'eau consommé	m ³	
Epuisement des ressources	Appauvrissement des ressources minérales et fossiles	kg d'antimoine éq.	
Changement climatique	Potentiel de réchauffement climatique	t CO ₂ éq.	

Déchets solides éliminés	Volume de déchets produits (inertes, dangereux et non dangereux)	t
Déchets solides éliminés	Quantité de déchets radioactifs produits	dm ³
Acidification atmosphérique	Contribution aux pluies acides et à la dégradation des forêts	kg SO ₂ éq.
Eutrophisation	Contribution à l'apport de nutriments en milieu aquatique causant le développement d'algues	kg PO ₄ éq.
Biodiversité	Pourcentage d'espèces animales disparues	PDF.m ² .an ⁻¹
Formation d'ozone photochimique	Formation d'ozone photochimique causée par la décomposition de composés organiques volatils (COV)	kg éthylène éq
Pollution de l'air - Odeur	Volume associé à un seuil de concentration tel que 50% des individus perçoivent cette odeur	mm ³ air
Toxicité humaine	Nombre d'années de vie en bonne santé perdu pour un être humain	DALY

Tableau 5 – Indicateurs évalués par NovaEQUER

2.5.2. UMI

Umi (Reinhart et al. 2013) est un outil de modélisation urbaine intégré au logiciel de modélisation 3D Rhinoceros 3D (McNeel 2013) qui s'adresse aux urbanistes et aux architectes soucieux d'intégrer les notions de performance énergétique et environnementale dans leurs projets. Depuis 2012, Umi est développé par le Sustainable Design Lab du Massachusetts Institute of Technology, avec l'appui de la National Science Foundation EFRI_SEED, de la MIT Energy Initiative, du Koweït-MIT Center, du Center for Complex Engineering Systems (CCES) et du MIT Transsolar Climate Engineering & United Technologies Corporation.

Umi est constitué de 3 modules permettant de répondre aux principaux enjeux rencontrés lors de la conception ou de la rénovation de zones urbaines : efficacité énergétique des bâtiments, éclairage et confort extérieur, et mobilité. Umi n'est pas à proprement parler un outil d'ACV de quartier, mais s'agissant des bâtiments, il s'intéresse à la fois à phase de construction, en proposant une évaluation de l'énergie grise, et à la phase d'usage en réalisant une évaluation des consommations d'énergie liées au chauffage et à la climatisation. Le module de simulation énergétique des bâtiments s'appuie sur le moteur de STD EnergyPlus et réalise des simulations à l'échelle de chacun des bâtiments en tenant compte des effets de masque pouvant être dus aux bâtiments/infrastructures adjacents. Les résultats de simulation peuvent ensuite être visualisés directement dans l'environnement Rhinoceros 3D. S'agissant de l'évaluation de l'énergie grise des bâtiments, Umi évalue les quantités de matériaux de construction à partir de la 3D des bâtiments et d'un certain nombre d'hypothèses, notamment sur la structure, le cloisonnement et le taux de vitrage.

Umi permet par ailleurs de calculer de manière automatisée un indicateur de potentiel d'éclairage annuel pour chaque étage de chaque bâtiment. Le calcul de cet indicateur s'appuie sur des simulations réalisées avec le programme Daysim qui évalue au pas de temps horaire les valeurs d'éclairage lumineux en façade des bâtiments. Ces simulations permettent également de réaliser une analyse du confort extérieur des quartiers. Un modèle simplifié est alors utilisé pour fournir une représentation des points chauds du quartier sur la seule base des niveaux d'irradiation solaire (sans tenir compte de la température radiante moyenne ou des effets locaux des vents) afin d'identifier les zones nécessitant la mise en place d'ombrages.

Umi s'intéresse enfin à la thématique de la mobilité au travers des notions de marchabilité et de cyclabilité. Il utilise la méthode d'évaluation Walkscore® et se base notamment sur la présence d'équipements

(commerces, banques, restaurants, écoles, etc.) dans le quartier pour mesurer son niveau d'adaptation aux modes de déplacement non motorisés. Un score est alors attribué à la zone étudiée en fonction de sa configuration. En outre, afin de convertir l'évaluation de la mobilité en émissions potentielles de gaz à effet de serre, Umi combine un module de génération de déplacements basé sur la méthode Walkscore® avec la température ambiante et les précipitations annuelles de la zone. Il prédit ainsi le nombre de déplacements moyens annuels pouvant être réalisés de manière non motorisée. L'objectif est alors d'illustrer l'influence de l'environnement construit sur la mobilité.

Indicateurs	Unités	Méthode de calcul
Consommations énergétiques des bâtiments	kWh	Simulations multi zones EnergyPlus
Energie grise	kWh	Décomposition des bâtiments en éléments fonctionnels auxquels sont associées des facteur d'énergie grise (Davila & Reinhart 2013)
Potentiel d'éclairage	%	Programmes Urban Daylight et Daysim. Les valeurs d'irradiation extérieures sont utilisées afin d'évaluer la contribution d'une façade à l'éclairage intérieur.
Mobilité - Marchabilité / Cyclabilité	Score	Méthode - Walkscore® basée notamment sur la présence d'infrastructures et d'équipements dans le quartier.

Tableau 6 – indicateurs évalués par UMI

UMI offre également la possibilité d'aborder la thématique du micro climat urbain par l'intermédiaire du module *Urban Weather Generator* (UWG) (Bueno et al. 2013) qui permet de modifier les fichiers météo pour EnergyPlus en fonction du contexte urbain.

2.5.3. SméO

SméO (Riera Perez 2013) est un logiciel gratuit et libre d'accès qui a pour objectif d'aider à la planification, la réalisation et l'exploitation des projets de construction et d'urbanisme selon les principes du développement durable. Initié par le Service du logement et des gérances de la Ville de Lausanne (Suisse) et le Service immeubles, il fait désormais l'objet du soutien de l'association Eco-Bau et d'un partenariat établi avec l'Office Fédéral de l'Energie, l'Office du Développement territorial et le Schéma Directeur de l'Ouest Lausannois.

SméO propose une intégration transversale de la durabilité des projets d'aménagement en effectuant une analyse du cycle de vie des opérations en fonction du stade d'avancement du projet. Il distingue dans ses analyses la phase de développement du projet (Initiation, Masterplan, Plan de quartier, Réalisation, Exploitation) des étapes du cycle de vie (Tableau 7 : Genèse, Matérialisation, Utilisation, Entretien et Déconstruction). Cela permet ainsi de faire évoluer les études en fonction du niveau de disponibilité des données.

Genèse	Matérialisation	Utilisation	Entretien	Déconstruction
Besoins, Gouvernance	Sols et paysage	Vie en commun	Eléments de construction	Démolition en fin de vie
Ressources	Infrastructures	Identité	Installations techniques	
Site et Architecture	Concept constructif	Viabilité	Frais d'entretien	
Collectivité	Matériaux	Sécurité		
Coûts et finances	Gestion du chantier	Confort et Santé		
	Investissement	Energies		

Eaux et déchets

Rentabilité

Tableau 7 - Liste des domaines traités par SméO pour chacune des étapes d'un projet de quartier (seules les 3 premières colonnes sont étudiées).

Les indicateurs suivis par SméO (Tableau 8) s'appuient sur l'ensemble des thématiques et critères abordés par la recommandation SIA 112/1 «Construction durable ». Les normes SIA (Société suisse des Ingénieurs et des Architectes) sont un recueil de règles comprenant des normes techniques, des textes de nature réglementaire, ainsi que des conditions générales pour la construction. Les indicateurs relatifs aux matériaux de construction et aux consommations d'énergie en phase d'exploitation ne sont pas à proprement parler des indicateurs ACV, puisque d'une part ils ne couvrent que les thématiques énergie et GES, d'autres part ils sont relatifs soit à la phase de production soit à la phase d'exploitation du cycle de vie.

SméO ne repose pas sur une modélisation 3D. Les quantités de matériau de construction sont calculées à partir de renseignements sur la configuration de chaque bâtiment ; surface et périmètre du radier (dalle de fondation contre terre), nombre moyen de niveaux et situations (à savoir si les surfaces sont majoritairement enterrés ou hors-sol), etc. L'utilisateur doit également spécifier les modes constructifs choisis pour les façades, la dalle inférieure, les dalles d'étage, la toiture, les murs intérieurs, les fenêtres et la complexité des installations techniques. SméO permet une première approximation de l'énergie grise du projet, dans le but d'anticiper et d'orienter les décisions.

Les consommations d'énergie sont calculées de manière normative (selon la norme SIA 380/1) en fonction du type de bâtiment (résidentiel, commercial, ...) ainsi que la performance énergétique ciblée (réglementaire, Minergie, Minergie-P).

Thématique	Indicateurs	Unités	Méthode de calcul
Sols et paysages	Densification	%	IBUS projet / IBUS légal
	Surface vertes	%	Pourcentage d'espaces verts sur la parcelle
	Régime des eaux	%	Pourcentage de surfaces perméables sur la parcelle
Matériaux de construction et cycle de vie	Part non renouvelable de la consommation annuelle d'énergie primaire	MJ/m ²	Non Renewable Energy (NRE) calculé à partir des logiciels d'ACV Lesosai et Eco-Bat. Contributeurs : construction, exploitation, mobilité.
	Emissions annuelle de gaz à effet de serre	kg CO ₂ éq/m ²	Global Warming Potential (GWP) calculé à partir des logiciels d'ACV Lesosai et Eco-Bat. Contributeurs : construction, exploitation, mobilité.
	Impact environnemental global annuel	UBP/m ²	Eco-points calculés à partir des logiciels d'ACV Lesosai et Eco-Bat. Contributeurs : construction, exploitation, mobilité.
Energies d'exploitation	Consommation annuelles en énergie primaire	MJ/m ²	Non Renewable Energy (NRE) utilisant des facteurs de conversion tirés de KBOB LCA data 2012. Contributeurs : construction, exploitation, mobilité.
	Classe pour la consommation en énergie primaire	Lettre	SIA 2031
	Fraction d'énergie primaire renouvelable	%	/
	Emissions annuelles de gaz à effet de serre	kg CO ₂ éq/m ² /an	Global Warming Potential (GWP) utilisant des facteurs de conversion tirés de KBOB LCA data 2012. Contributeurs : construction, exploitation, mobilité.

	Classe pour l'émission de gaz à effet de serre	Lettre	SIA 2031
	Impact environnemental global annuel	UBP/m ² /an	Eco-points utilisant des facteurs de conversion tirés de KBOB LCA data 2012. Contributeurs : construction, exploitation, mobilité.

Tableau 8 - Indicateurs environnementaux évalués par Sméo

Pour la présentation des résultats Sméo utilise un code couleur basé sur la méthode d'agrégation multicritère Hermione (Flourentzou 2003; Poncin & Flourentzou 2003) qui permet de faciliter la compréhension et la lecture des résultats.

2.5.4. SOLEN

L'outil SOLEN (SOLUTIONS for Low Energy Neighbourhoods (LEMA-ULg & AEC-UCL 2014)) est issu des projets de recherches SAFE et SOLEN dont l'objectif était de développer et publier un outil informatique interactif, accessible sur le web, qui permette d'évaluer l'efficacité énergétique des quartiers wallons existants sur le plan du bâti, de la mobilité et de l'intégration d'énergies renouvelables. La première version de l'outil était uniquement dédiée aux logements et aux quartiers périurbains alors que la version actuelle a été étendue à l'ensemble des quartiers et logements.

SOLEN est destiné à l'ensemble des acteurs du processus de conception, réalisation et rénovation du milieu urbain ainsi qu'aux citoyens. Son objectif est de permettre à différentes catégories d'utilisateurs d'évaluer les consommations énergétiques de leur logement et de leurs déplacements ainsi que le potentiel relatif à différents types d'énergies renouvelables. SOLEN comprend trois outils d'évaluation énergétique des bâtiments et des quartiers (évaluation individuelle rapide ou détaillée et évaluation quartier) et des fiches pratiques traitant des consommations énergétiques des bâtiments, de la mobilité durable et des énergies renouvelables.

Les modules d'évaluation individuelle permettent d'estimer les consommations énergétiques relatives aux déplacements (domicile-travail et domicile-école) et au chauffage du logement d'un utilisateur de façon plus ou moins précise. Les informations à compléter varient en fonction du niveau de détail ciblé. L'outil d'évaluation d'un quartier permet quant à lui de réaliser l'évaluation énergétique de tout un quartier, sur le plan des consommations énergétiques relatives aux déplacements de ses habitants (domicile-travail et domicile-école) et au chauffage des logements qui le composent. Il s'adresse plus spécifiquement aux professionnels de la construction et de l'aménagement du territoire désireux d'estimer de façon rapide les consommations énergétiques d'un quartier existant, en projet ou soumis à rénovation (rénovation énergétique, densification, etc.) et d'obtenir des pistes d'améliorations concrètes et chiffrées.

Contrairement aux objectifs initialement affichés dans les projets SAFE et SOLEN, l'outil ne propose pas à l'heure actuelle d'évaluation de l'énergie grise. On ne peut donc pas parler d'outil d'ACV quartier. L'évaluation des consommations énergétiques liées au chauffage fait appel à une base de données de 250000 résultats de simulation thermique dynamique développée spécifiquement pour l'outil. Les effets de l'orientation et de la forme urbaine sont pris en compte au travers de « facteurs solaires » définis sur la base du type de quartier étudié (centre-ville dense, urbain continu, urbain semi-continu, semi-continu homogène ou cité sociale, village ou noyau rural, lotissement périurbain, rural isolé, grands ensembles).

Thématique	Indicateurs	Unités	Méthode de calcul
Transport	Desserte en train	Appréciation (faible / moyen / bon)	/
	Desserte en bus	Appréciation	

		(faible / moyen / bon)	
	Mixité fonctionnelle	Appréciation (faible / moyen / bon)	
	Proximité des écoles	Appréciation (faible / moyen / bon)	
	Accessibilité globale du quartier	Score	
	Consommations annuelles des habitants pour les déplacements	kWh/an	
Logement	Consommations annuelles énergie	kWh/m ² /an	Simulations énergétiques génériques de logements types réalisées sur TRNSys et hypothèses.
	Consommations annuelles par type d'habitation (quartier)	kWh/an	
	Consommations annuelles par postes énergétiques (quartier)	kWh/an	
	Consommation de chauffage annuelle par niveau de performance (quartier)	kWh/an	
	Production énergies renouvelables	kWh/an	
	Emissions de GES	kgCO ₂ eq /an	

Tableau 9 - Indicateurs évalués par SOLEN

2.5.5. NEST

NEST est un plugin pour le logiciel de modélisation 3D Trimble Sketchup qui permet l'évaluation quantitative de la durabilité des opérations d'aménagement à l'échelle quartier. Il est issu des travaux de Yepez-salmon (2011), réalisés au sein de NOBATEK/INEF4 et du laboratoire GRECAU de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture et Paysage de Bordeaux. Suite à ces travaux, NOBATEK/INEF4 a continué les développements du plugin dans le cadre de différents projets de R&D afin d'affiner et d'améliorer les évaluations réalisées.

NEST a été développé pour l'analyse des projets d'aménagement en phase amont; il est en adéquation avec les données disponibles à ces phases de projet, et repose sur le logiciel SketchUp, un modèleur 3D extrêmement simple et très largement utilisé par les architectes et les urbanistes pour l'élaboration de plan masse. La vocation de NEST est d'accompagner les maitrises d'ouvrage en objectivant leur prise de décision par le calcul d'indicateurs quantitatifs multithématiques. Une partie des indicateurs calculés par NEST s'appuie sur la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (énergie primaire totale, changement climatique, qualité de l'air) qui permet de fournir une évaluation multi-étapes et multicritères des enjeux associés à la durabilité d'une opération d'aménagement. Les autres indicateurs comptabilisent des flux (quantité de déchets, consommation d'eau et coût) et permettent de compléter l'analyse de l'opération. Les indicateurs évalués par NEST sont récapitulés dans le Tableau 10.

Thématiques	Indicateurs	Méthode de calcul de l'indicateur	Unité
Environnement	Energie primaire totale	Indicateur basé sur la méthode CML 2002. Contributeurs : ensemble des phases du cycle de vie des matériaux de construction des bâtiments, des espaces publics, des voiries et infrastructures ; utilisation des bâtiments et infrastructures (consommations énergétiques) ; mobilité ; approvisionnement et traitement de l'eau ; traitement et collecte des déchets.	MJ/an/usager
	Changement climatique	Indicateur basé sur la méthode IPCC 2007 GWP 200a. Contributeurs identiques à l'indicateur énergie primaire totale.	kgCO ₂ eq /an/usager

	Déchets	Indicateur de flux permettant l'évaluation des quantités de déchets générés par le quartier (déchets réutilisables, triables, non triables et compostables).	t/an/usager
	Qualité de l'air	Indicateur « endpoint » basé sur la méthode d'EICV ReCiPe et l'indicateur « Human Health », perspective « hiérarchiste ». Contributeurs : « Human Toxicity », « Photochemical oxidation formation », « Particule matter formation » et « Ionising radiation ».	DALY (Disability Adjusted Life Years)
	Eau	Indicateur de flux développé par Nobatek. Contributeurs : consommations d'eau liées au chantier, aux bâtiments et à l'entretien du quartier.	m ³ /an/usager
Social	Qualité de vie	Indicateur développé par Nobatek s'appuyant sur le référentiel INDI (Charlot-Valdieu & Outrequin 2012). Contributeurs : présence de cabinets médicaux, écoles, commerces, espaces verts, pistes cyclables, dessertes de transport en commun, niveau d'efficacité énergétique et densité de population.	Score
Economie	Coût	Indicateur développé par Nobatek qui délivre une approximation du coût de construction du quartier et d'une partie de ses coûts d'utilisation. Contributeurs : coûts de construction (bâtiments, voiries, aménagement) et usage (éclairage, entretien, consommations énergétique).	€/an/usager

Tableau 10 – Indicateurs évalués par NEST

Concernant l'évaluation des impacts environnementaux liés aux matériaux de construction (dont l'énergie grise), NEST n'évalue pas directement les quantités de matériaux. A partir du modèle 3D simplifié du quartier, l'outil récupère les surfaces de plancher par type de bâtiment. L'évaluation des impacts fait ensuite appel à une base de données développée par NOBATEK/INEF4 qui regroupe des facteurs d'impacts exprimés par m² de plancher pour les différents types de bâtiments.

Concernant l'évaluation des consommations énergétiques, et notamment relatives au chauffage, NEST utilise les stratégies suivantes :

- Cas 1 : Pour les bâtiments existants construits avant 2005 : Les consommations retenues pour le chauffage sont des données statistiques issues de la base de données EPISCOPE². Les données sont disponibles par type de bâtiments (logements individuels, collectifs, tertiaire-éducation, tertiaire-bureaux/commerces) et par zone thermique pour les 2 première typologies (H1, H2, H3).
- Cas 2 : Pour les bâtiments existants construits après 2005 et les bâtiments neufs : L'utilisateur spécifie le niveau de performance visé par le bâtiment (RT 2005, 2012 ou Effinergie +). A partir des données de caractérisation du bâtiment (surface, nombre de logements, système de chauffage, présence ou non de climatisation...) et du quartier (zone thermique, altitude), un seuil de consommation basé sur la RT 2012 est calculé (exprimé en kWh EP /m²/ an). Cette valeur est diminuée de 20% si le niveau Effinergie + est sélectionné et augmentée de 20% si le niveau RT 2005 est sélectionné. La répartition des impacts par postes réglementaires est basée sur des hypothèses établies par NOBATEK/INEF4.

L'outil permet par ailleurs de comparer différents scénarios d'aménagement et d'accompagner les équipes des projets dans leurs prises de décisions. Il propose ainsi une fenêtre de visualisation des résultats simplifiée, facilitant leur compréhension et leur diffusion.

² <http://episcope.eu/index.php?id=97>

Le Tableau 11 présente les principales caractéristiques des outils précédemment présentés ; frontières du système, phases du cycle de vie, mode de calcul des quantités de matériaux de construction pour les bâtiments et source des données environnementales associées, mode de calcul des consommations énergétiques liées au chauffage et à la climatisation et source des données environnementales associées, thématiques étudiées (énergie, environnement, social, économique).

Il est intéressant de noter que parmi ces outils que se réclament de l'ACV, seuls NovaEQUER et NEST proposent véritablement un calcul d'indicateurs relevant de l'évaluation des impacts du cycle de vie des quartiers. Et seul NovaEQUER exploite pleinement le caractère multicritère de l'ACV.

Relativement à la thématique qui nous intéresse, c'est-à-dire l'influence de la forme urbaine sur l'évaluation environnementale des projets d'aménagement, nous pouvons à ce stade classer ces outils selon qu'ils permettent ou non de tenir compte de cette influence sur l'énergie grise et sur les consommations d'énergie pour le chauffage et la climatisation :

- NEST : la forme urbaine n'a d'influence ni sur l'énergie grise, ni sur les consommations d'énergie
- SOLEN : la forme urbaine a de l'influence sur les consommations d'énergie seulement
- Sméo : la forme urbaine a de l'influence sur l'énergie grise seulement
- NovaEQUER et Umi : la forme urbaine a de l'influence sur l'énergie grise et sur les consommations d'énergie

Parmi les outils permettant de rendre compte de l'influence de la forme urbaine sur les deux thématiques majeurs que sont l'énergie grise et les consommations d'énergie relatives au chauffage et à la climatisation, l'un NovaEQUER est un outil expert destiné aux phases avancées de conception d'un projet de développement urbain, l'autre Umi, s'inscrit dans la démarche cherchant à proposer des évaluations compatibles, en termes de données et de niveau d'expertise, avec les phases amont de conception de projets d'aménagement. Cette démarche se traduit principalement dans un travail d'interface et d'ergonomie pour rendre accessible des outils de simulation à un plus large public. Cependant Umi nécessite la possession d'une suite logicielle complexe (Modeleurs 3D (Rhino), plugin environnemental (Umi), moteur de STD (EnergyPlus), ainsi que d'un minimum de connaissances techniques des différents types de simulation.

Outils	Frontières du système	Phases du cycle de vie	Calcul des quantités de matériaux	Calcul des besoins thermiques / consommations énergétique pour le chauffage et la climatisation	Sources des données environnementales - Matériaux	Sources des données environnementales - Consommations d'énergie	Thématiques étudiées
NEST	B, EExt, R, M	Cons., Expl., FdV	Modélisation 3D simplifiée de l'ensemble du quartier. Les quantités de matériaux ne sont pas évaluées. Seules les Surface planchers sont comptabilisées à partir de la 3D. L'outil fait ensuite appel à une base de données d'impacts environnementaux rapportés au m ² de plancher	Pour les bâtiments antérieurs à 2005, les consommations sont évaluées sur une base statistique. Pour les bâtiments postérieurs à 2005, les consommations sont évaluées via le calcul d'un seuil de consommation basé sur la RT 2012 et qui dépend de la caractérisation du bâtiment (surface, nombre de logements, système de chauffage, présence ou non de climatisation...) et du quartier (zone thermique, altitude). Ce seuil est ensuite modulé par en fonction du niveau de performance visé par le bâtiment (RT 2005, 2012 ou Effinergie +)	Base INIES adaptée	Base Ecoinvent adaptée	Energie – Environnement – Economie - Social
NovaEQUER	B, EExt, R, M	Cons., Expl., FdV	Modélisation 3D détaillée de chaque bâtiment et affectation de matériaux à l'ensemble des éléments des bâtiments	Simulation thermique dynamique sur modèles de bâtiments détaillés	Base Ecoinvent, Base INIES	Base Ecoinvent	Energie – Environnement
UMI	B, EExt, M	Cons., Expl., FdV	Modélisation 3D simplifiée de l'ensemble du quartier. Les quantités de matériaux sont évaluées à partir de la 3D et d'hypothèse concernant notamment la structure, les vitrages et les cloisons.	Simulation thermique dynamique sur modèles de bâtiments simplifiés	Inventory of Carbon and Energy – Université de Bath	ASHRAE 189.1	Energie – Environnement (émissions GES)
SOLEN	B, M	Expl.	NR – les phases de production et de vie en œuvre ne sont pas prises en compte	Appel à une base de données de 250000 résultats de simulation thermique dynamique. Les effets de l'orientation et de la forme urbaine sont pris en compte au travers de « facteurs solaires » définis sur la base du type de quartier étudié.	/	CWaPE, SPW et Energie+	Energie – Environnement – Economie - Social
SméO	B, EExt, M	Cons., Expl.	Pas de modélisation 3D. Les bâtiments sont décrits à l'aide de paramètres tels que la surface et le périmètre du radier et le nombre de niveau. Sur cette base, les mètres des principaux composants des bâtiments sont évalués	Les consommations d'énergie sont calculée de manière normative en fonction du type de bâtiment ainsi que la performance énergétique ciblée (réglementaire, Minergie, Minergie-P).	Données des écobilans dans la construction - KBOB	Données des écobilans dans la construction - KBOB	Energie – Environnement (émissions GES)

Tableau 11 – Caractéristiques principales des outils

2.6. CONCLUSIONS

Dans le cadre de cette revue critique des cas d'application de l'ACV à l'évaluation de l'environnement bâti à l'échelle du quartier, nous proposons une synthèse et une analyse des principaux choix méthodologiques. Les études de cas sont encore relativement peu nombreuses et les choix méthodologiques sont très hétérogènes, et ce pour chaque phase de l'ACV. Certains articles étudient des quartiers existants ou des quartiers modèles de grande dimension et les utilisent comme des quartiers prototypes pour éclairer les politiques urbaines sur des problématiques telles que les impacts environnementaux de la densité résidentielle. D'autres articles ont recours à l'ACV comme outil d'aide à la décision dans le cadre de phases amont de conception de projets d'aménagement. En ce qui concerne la phase de définition de l'objectif et du périmètre d'étude, la définition de l'unité fonctionnelle, la sélection des frontières du système, et la durée de vie du quartier varient selon les études. Cette absence de consensus empêche de fournir une comparaison directe des résultats d'évaluation d'impact pour notre corpus d'études de cas. La phase de l'ICV est un point critique en raison de la taille du système « quartier », et plusieurs stratégies sont proposées pour fournir des données sur les principaux processus de premier plan, à savoir (i) les quantités de matériaux de construction pour les bâtiments, (ii) les consommations d'énergie en phase d'usage des bâtiments, et (iii) les besoins de transport. Ces stratégies vont de l'usage de données statistiques ou de la méta-analyse d'ACV de bâtiments et d'infrastructures, à des simulations détaillées basées sur des modélisations à base statistique ou à base physiques. En termes d'évaluation des impacts, 35% des documents se concentrent sur deux catégories d'impact seulement : la demande d'énergie cumulée et le changement climatique. D'autres études représentent une douzaine de catégories d'impact. Très peu d'articles traitent de la qualité de l'air ou de l'occupation des sols alors que ces catégories d'impact sont pertinentes dans le cadre de l'évaluation environnementale urbaine. Une seule étude mobilise les méthodologies d'EICV les plus récentes et une étude n'utilise de méthodes régionalisées. En ce qui concerne la phase d'interprétation des résultats, on peut noter que seules deux études fournissent une analyse de sensibilité.

De même que l'ensemble des documents analysés, notre revue critique met en évidence le fait que l'application de l'ACV à l'évaluation de quartiers n'est pas directe et encore mal encadrée. Chaque étude propose sa propre adaptation de l'ACV à l'échelle quartier, et leur étude nous a permis de dégager des recommandations et de lister les principaux enjeux pour l'ACV de quartiers :

- Lors de l'évaluation de l'environnement bâti à l'échelle du quartier les principales caractéristiques du quartier devraient être communiquées systématiquement pour améliorer l'intelligibilité des résultats et la comparabilité entre les études; le nombre d'habitants, le nombre d'usagers non-résidents, la superficie du quartier, la surface plancher totale, la durée de vie du quartier ainsi que la durée d'analyse.
- Dans le cadre de l'évaluation environnementale de projets d'aménagement, l'influence de l'environnement bâti (morphologie urbaine, stratégie de végétalisation, choix des matériaux de surface) sur les consommations d'énergie des bâtiments devrait être prise en compte. Cet élément de contextualisation doit être abordé avec des méthodes compatibles avec les données disponibles au stade d'établissement du plan masse d'une opération d'aménagement.
- Un autre enjeu réside dans la collecte ou la production de données d'inventaire de cycle de vie pour les bâtiments en ce qui concerne les matériaux de construction. Pour une application à l'échelle du quartier, et donc à un grand nombre de bâtiments, il est nécessaire de développer des

approches intermédiaires qui s'appuient sur des archétypes de bâtiments tout en exploitant les données disponibles sur leur forme.

- L'environnement bâti à l'échelle du quartier est un système complexe multifonctionnel. L'ACV d'un tel système pourrait tirer profit du cadre de l'ACV territoriale (Loiseau 2014). Cette approche consisterait à fournir en plus des indicateurs d'impacts environnementaux potentiels, une série d'indicateurs qui évalueraient la performance du quartier relativement à un certain nombre de fonctions à déterminer.
- Pour des systèmes aussi complexes et aux durées de vie aussi longues que les quartiers, l'accent devrait être mis sur l'inclusion systématique dans les études d'analyses portant sur les incertitudes liées aux évolutions temporelles à long terme de paramètres clés.
- La dynamique temporelle du mix électrique devrait également être prise en compte, en particulier pour les quartiers à basse consommation d'énergie (y compris en ce qui concerne la production sur site d'énergie renouvelable).
- Les développements des méthodes d'EICV permettent aujourd'hui une évaluation multicritère complète et exhaustive de l'environnement bâti. Les approches monocritère devraient être évitées, et ce afin d'éviter les déplacements de la pollution entre catégories d'impact.
- Un ensemble minimum de catégories d'impacts et de dommages devrait être adopté pour l'évaluation environnementale de quartiers. Il pourrait inclure des catégories d'impact telles que l'occupation des sols, la qualité de l'air et l'épuisement des ressources abiotiques non fossiles (en plus d'un ensemble plus classique des catégories d'impact) qui semblent très pertinents pour l'évaluation de l'environnement bâti.
- Les progrès récents en termes de régionalisation des modèles d'évaluation des impacts locaux et régionaux devraient être adaptés dans le cadre de l'ACV de quartiers.
- d'un point de vue plus opérationnel, il n'existe pas à ce stade d'outil d'ACV à l'échelle du quartier, qui soit compatible avec les phases amont de conception de projet d'aménagement, et qui permette de prendre en compte la forme urbaine proposée au stade du plan masse, qui est pourtant un des leviers majeurs pour la performance, notamment énergétique d'un quartier.

Cette revue critique ouvre la voie à de futures recherches dont l'objectif serait le développement d'une approche normalisée pour l'évaluation de la performance environnementale de l'environnement bâti à l'échelle du quartier. Une question d'autant plus essentielle que l'échelle du quartier est une échelle opérationnelle du développement urbain. Nos travaux de thèse participent à ces développements et visent à proposer des approches simplifiées pour la production de données d'ICV relatives aux bâtiments à l'échelle du quartier et compatibles avec l'évaluation d'un projet d'aménagement au stade du plan masse. Ainsi nous présentons une approche d'évaluation de l'énergie grise et de l'empreinte carbone des bâtiments (Chapitre 4), ainsi qu'une approche d'évaluation des potentiels de chauffage et de confort d'été passif des bâtiments à l'échelle du quartier (Chapitre 6). Ces deux approches sont sensibles à la morphologie urbaine proposée par le plan masse.

Chapitre 3. Interactions forme urbaine, climat et énergie

3.1. INTRODUCTION

Les villes sont caractérisées par un microclimat spécifique dont la manifestation principale est le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) qui se traduit par des températures plus élevées en ville que dans les alentours. La modification du climat urbain est liée à différents facteurs dont la forme urbaine, les matériaux qui constituent le tissu urbain ou encore les charges anthropiques qui y sont dissipées du fait des activités humaines. Les bâtiments participent de façon importante à l'amplification du réchauffement urbain, via les dissipations thermiques en hiver et via les systèmes de climatisation en été, qui peuvent représenter une part significative des charges anthropiques, d'autant plus que leur charge augmente avec la hausse de la température extérieure. Dans le cadre de l'adaptation des villes au changement climatique et alors que le GIEC a annoncé en 2014 que l'augmentation des températures moyennes à la surface de la planète pourrait atteindre 4,8°C à l'horizon 2100 (IPCC 2014), il est nécessaire de mieux connaître et prévoir l'impact de l'urbanisation sur l'effet d'ICU.

Les consommations énergétiques des bâtiments sont elles aussi grandement influencées par le contexte urbain, et notamment les consommations liées au chauffage, à la climatisation et à l'éclairage. En 2015, La consommation d'énergie finale de la France (hors consommations de la branche énergie) est de 149 Mtep, et les consommations respectives des secteurs du bâtiment résidentiel et tertiaire sont de 45 Mtep et 22 Mtep. Ces secteurs représentent 45 % des consommations d'énergie et 25 % des émissions de CO₂. Au niveau national, le secteur du bâtiment constitue donc une des clés pour le respect de l'engagement pris en 2003 de diviser par un facteur 4 les émissions nationales de gaz à effet de serre d'ici 2050 en partant du niveau de 1990. L'atteinte du facteur 4 ne pourra se réaliser qu'avec des efforts importants consentis à la fois dans la performance énergétique de l'habitat neuf mais également pour la rénovation du stock important de bâtiments existants. Pour l'un comme pour l'autre, l'action sur les sollicitations climatiques locales par les choix de formes urbaines (pour les projets d'aménagement notamment) ou par des choix en termes de matériaux ou de végétalisation (pour la rénovation notamment) constituent un des leviers pour réduire les consommations d'énergie.

Dans ce contexte, les décideurs ont un besoin grandissant de connaissance des impacts des formes et usages de la ville. L'utilisation de ces leviers nécessite des outils d'évaluation et d'aide à la décision sur la thématique des consommations énergétiques à l'échelle du quartier. Les outils d'aide à la décision procèdent par comparaison entre projets ou variantes de projets (logique de score relatif), alors que les outils d'évaluation comparent un projet à des objectifs (logique de score absolu) (Adolphe 2001; Adolphe 2009). Le processus de conception d'un projet urbain est un processus complexe basé sur la transformation de contraintes en formes, espaces et flux. Les phases amont de conception ont une importance cruciale puisqu'elles fixent les principales orientations des projets. Cependant elles se caractérisent également par un manque d'information. C'est à ce stade que l'usage d'outils d'aide à la décision est le plus bénéfique, du fait que les outils traditionnels d'ingénierie requièrent une quantité d'information importante, qui correspond à celle disponible à des phases beaucoup plus avancées des projets, phases auxquelles les degrés de liberté liés à la forme sont déjà fixés.

Les zones urbaines, de par la nature des surfaces en présence, leur géométrie et la nature des activités qui y sont concentrées, présentent un bilan énergétique de surface très différent du bilan énergétique des surfaces naturelles. Les spécificités de ce bilan proviennent d'interactions entre les surfaces urbaines et

les sollicitations climatiques auxquelles elles sont soumises. Ces interactions sont nombreuses et de natures variées. On les présente classiquement en trois classes qui reposent sur les phénomènes de rayonnement courte longueur d'onde (CLO), les phénomènes de rayonnement grande longueur d'onde (GLO), et le vent. A ces trois catégories vient s'ajouter le phénomène intégré d'ICU qui résulte des effets combinés de l'ensemble des interactions précédemment évoquées qui produisent une élévation de la température de l'air en milieu urbain.

Ces interactions, que nous allons décrire par la suite, donnent naissance à l'échelle de la ville et du quartier à des conditions microclimatiques locales qui conditionnent les besoins énergétiques des bâtiments, les conditions de confort intérieur, mais également le potentiel de productions d'énergie renouvelable, les conditions de confort dans les espaces publics, l'îlot de chaleur urbain ou encore les phénomènes de concentration et de dispersion de polluants.

La représentation des phénomènes physiques urbains est relativement aisée, mais celle des multiples interactions entre eux l'est moins. Cependant, les processus physiques (thermique, aérodynamique, hydrologie, rayonnement...) impliqués dans le microclimat urbain et le comportement thermique des bâtiments ne peuvent être considérés indépendamment les uns des autres. Comme détaillé dans (Musy et al. 2012), la prise en compte de ces interactions nécessite le couplage entre trois bilans :

- le bilan hydrique : échanges d'eau entre la surface urbaine et l'atmosphère,
- le bilan énergétique de la surface urbaine : équilibre entre le rayonnement net, le flux de chaleur latente issu du bilan hydrique, le flux de chaleur sensible (convection), et le flux de chaleur par conduction dans les sols et au travers de l'enveloppe des bâtiments,
- le bilan sur l'air de la canopée urbaine

Dans ce contexte, le bilan thermique des bâtiments est considéré comme un niveau de détail supplémentaire du bilan énergétique de la surface urbaine : équilibre entre les flux de chaleur au travers des murs et des toits, les apports solaires, les charges internes et les flux liés à la ventilation et aux infiltrations de l'air à travers l'enveloppe.

En pratique, les interactions entre ces bilans sont souvent négligées ou simplifiées ce qui donne lieu à quatre grands types de modèles ; les modèles hydrologiques, les modèles de bilan radiatif, les modèles aérauliques et les modèles de bilan thermique. Ces modèles sont en constante évolution pour intégrer davantage ces interactions, soit en les modélisant directement, soit par voie de couplage entre modèles.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les liens entre forme urbaine, climat et potentiels bioclimatiques à l'échelle du quartier. Nous désignons par potentiels bioclimatiques, des indicateurs de performance relatifs à des composantes de bilans énergétiques appliqués à la forme urbaine, lorsque celles-ci sont évaluées en phase amont de conception d'un projet d'aménagement à l'échelle du quartier, c'est-à-dire lorsque seuls les grands principes de l'aménagement (plan masse, trame viaire, nature des surfaces) et les gabarits des bâtiments sont connus. Les potentiels bioclimatiques considérés sont notamment le potentiel de chauffage passif, le potentiel de confort d'été passif, le potentiel de production d'énergie renouvelable (EnR) solaire et le risque de contribution à l'ICU.

Nous nous intéressons dans cet état de l'art à trois types d'approches pour l'étude de ces interactions. Nous nous focalisons d'abord sur les approches physiques ; bilan énergétique de la surface urbaine et bilan thermique des bâtiments. Puis nous explorons les approches morphologiques.

- Approche 1 : la modélisation climatique urbaine à l'échelle du quartier, qui renseigne sur les sollicitations microclimatiques locales spécifiques à l'urbain
- Approche 2 : la modélisation de la performance énergétique des bâtiments en milieu urbain, qui permet de rendre compte de l'influence du contexte urbain sur la performance énergétique des bâtiments
- Approche 3 : les approches morphologiques, basées notamment sur des indicateurs morphologiques et qui essaient de s'abstraire des contraintes liées à la simulation

Les approches de modélisation donnent classiquement lieu au développement d'outils d'évaluation, alors que les approches morphologiques ont pour objectifs de proposer des outils simplifiés d'aide à la décision. Pour chacune de ces trois classes d'approches, nous nous attachons à présenter les bases théoriques, les principaux outils existants, ainsi que la littérature qui les met en œuvre spécifiquement pour l'étude de la performance de fragments urbains.

3.2. MODELISATION CLIMATIQUE URBAINE A L'ECHELLE DU QUARTIER

3.2.1. Bilan énergétique d'une surface urbaine

Dans cette section d'état de l'art, afin d'exposer plus en détail les bases des interactions entre surfaces urbaines et microclimat urbain, nous introduisons le bilan énergétique d'une maille surfacique d'un objet urbain, puis nous montrons comment ce bilan doit être adapté au niveau de la scène urbaine dans son ensemble. Enfin nous introduisons le rôle du végétal au travers du cas particulier du bilan énergétique d'une paroi végétalisée de bâtiment. Les bilans présentés ci-dessous reflètent également la logique de modélisation du logiciel de simulation thermo-radiative SOLENE (Miguet 2000) et de son évolution SOLENE-microclimat (Bouyer et al. 2011) qui intègre à SOLENE des modèles thermiques et qui met en œuvre le couplage avec un modèle aéraulique. Il est à noter que dans le cadre de notre recherche nous mettons en œuvre SOLENE-microclimat en mode non-couplé (cf. Chapitre 5).

3.2.1.1. Bilan énergétique d'une maille surfacique d'un objet urbain

Comme exposé en détail par (Bouyer 2009), le bilan d'énergie en régime permanent d'une maille surfacique d'un objet urbain, en densité surfacique de flux [$W.m^{-2}$], s'écrit :

$$Q_R = Q_H + Q_L + Q_C \quad \text{eq. 1}$$

Q_R : flux radiatif net [$W.m^{-2}$]

Q_H : flux convectif [$W.m^{-2}$]

Q_L : flux latent [$W.m^{-2}$]

Q_C : flux conductif [$W.m^{-2}$]

Le flux radiatif net Q_R est le flux radiatif reçu et absorbé par la surface. Celui-ci est généralement calculé en prenant en compte les deux composantes qui contribuent le plus au bilan énergétique : le rayonnement solaire (courtes longueurs d'ondes, comprises entre 0,3 et 3 μm) et le rayonnement infrarouge thermique (grandes longueurs d'ondes, comprises entre 3 et 100 μm). Ce bilan radiatif prend en compte les flux reçus et ceux émis ou réfléchis. Il se décompose ainsi de la manière suivante :

$$Q_R = (1 - \rho)R_{CLO,g} + R_{GLO,urb} + R_{GLO,ciel} \quad \text{eq. 2}$$

ρ : albédo de la surface

$R_{CLO,g}$: flux solaire global incident [$W.m^{-2}$]

$R_{GLO,urb}$: flux GLO net échangé avec les surfaces des bâtiments, le sol et toutes les autres surfaces vues appartenant à la canopée urbaine [$W.m^{-2}$]

$R_{GLO,ciel}$: flux GLO net échangé avec le ciel [$W.m^{-2}$]

$R_{GLO,tot} = R_{GLO,urb} + R_{GLO,ciel}$ est le flux GLO total.

Les flux CLO

Le flux solaire global incident ($R_{CLO,g}$) est la somme de trois flux CLO ; le flux provenant directement du soleil $R_{CLO,dir}$, le flux solaire diffus en provenance du ciel $R_{CLO,dif}$, et le flux solaire diffus en provenance des inter-réflexions à l'intérieur de la scène urbaine $R_{CLO,inter}$.

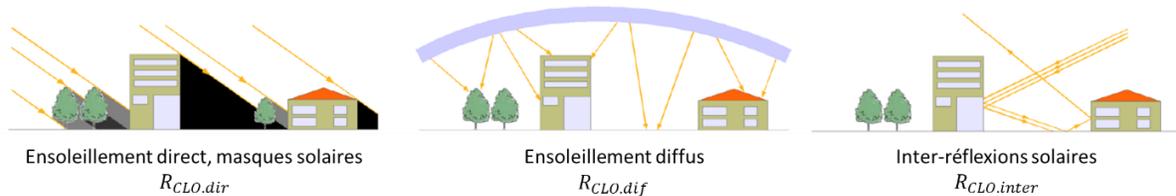


Figure 6 - Les trois termes du rayonnement solaire; flux solaire direct, flux solaire diffus et inter-réflexions solaires (Bouyer et al. 2010)

$R_{CLO,abs} = (1 - \rho)R_{CLO,g}$ est la quantité de flux solaire absorbé par la surface.

Le flux solaire absorbé dépend donc fortement de la géométrie de la scène urbaine, mais également de l'albédo de la surface étudiée ainsi que des albédos de l'ensemble des surfaces de la scène urbaine qui conditionnent les inter-réflexions. La présence de végétation joue également un rôle important sur le flux solaire incident global, soit par effet d'ombrage pour les arbres, soit par des valeurs spécifiques d'albédo pour les surfaces végétalisées.

Les flux GLO

Chaque surface de l'environnement urbain est considérée comme un corps gris, à la fois source et réceptrice de rayonnement GLO. Elle émet en fonction de sa température (T_s) selon l'équation eq. 3.

$$R_{GLO,emis} = \varepsilon\sigma T_s^4 \quad \text{eq. 3}$$

avec ε l'émissivité de la surface et σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$).

Un flux GLO, $R_{GLO,urb}$, est échangé entre deux surfaces dès lors que leurs températures sont différentes et qu'elles se voient.

Chaque surface dont le facteur de vue du ciel est non nul échange également un flux GLO avec le ciel, $R_{GLO,ciel}$.

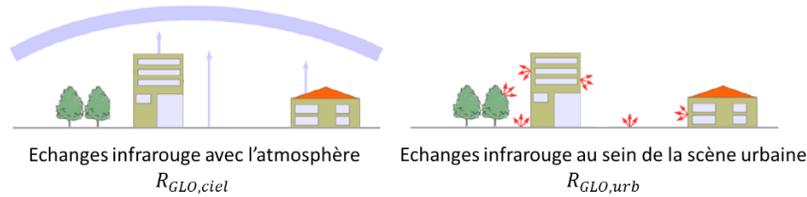


Figure 7 - Les deux termes du bilan GLO; les flux GLO échangés avec le ciel et avec la scène urbaine (Bouyer et al. 2010)

Le flux GLO total au niveau d'une surface dépend donc fortement de la géométrie de la scène urbaine, et ce de manière directe, via les facteurs de formes et facteurs de vue du ciel, et de manière indirecte via les températures des surfaces. Il dépend également de l'émissivité des matériaux de la scène urbaine. La présence de la végétation joue également un rôle sur le flux GLO total, par effet de masque pour les arbres, et via des valeurs d'émissivité et surtout des températures de surfaces spécifiques aux surfaces végétalisées.

Le flux convectif

L'échange de chaleur par convection thermique est dû aux transferts aérodynamiques de chaleur entre les surfaces solides et la masse d'air, du fait de leur différence de température. Il s'effectue simultanément par convection naturelle et par convection forcée.

La densité du flux convectif est reliée à la différence entre la température de la surface T_s et la température d'air T_{air} , par le coefficient d'échange superficiel convectif h_c :

$$Q_H = h_c(T_s - T_{air}) \quad \text{eq. 4}$$

Le coefficient d'échange par transfert convectif est souvent proposé comme dépendant de l'écart de température $T_{air} - T_s$ (convection naturelle) ou de la vitesse du vent (convection forcée), voire des deux dans le cadre de la convection mixte (McAdams 1954).

Le flux convectif dépend donc de la vitesse du vent, de la température de surface et de la température de l'air. Il dépend donc indirectement de la géométrie de la scène urbaine qui conditionne ces trois paramètres.

Le flux latent

Le flux latent est dû au changement de phase de l'eau dans ou sur les surfaces urbaines : les surfaces d'eau, les sols naturels, les surfaces végétales, les surfaces poreuses, ou les surfaces imperméables qui sont couvertes d'eau. L'évaporation de l'eau induit une consommation importante d'énergie au niveau de la surface et conduit donc à un abaissement de sa température.

Dans le cas de surfaces végétales, (Malys 2012) propose de calculer le flux latent comme le produit du taux d'évapotranspiration par l'évapotranspiration potentielle climatique. L'évapotranspiration potentielle climatique se calcule comme une fonction de la résistance aérodynamique du feuillage, elle-même dépendante de la vitesse du vent, et en fonction de la résistance stomatique du feuillage qui dépend du LAI du feuillage (Leaf Area Index) et de la résistance stomatique d'une feuille isolée.

Le flux conductif

Le flux conductif correspond à la conduction de la chaleur dans les matériaux. C'est le produit de la conductivité thermique et du gradient de température dans l'épaisseur du matériau.

Il dépend notamment de la température de surface, donc indirectement de la géométrie de la scène urbaine, et de la nature des matériaux (conductivités thermiques, épaisseurs).

3.2.1.2. Bilan énergétique d'une surface urbaine

A l'échelle d'un fragment urbain, on considère une surface avec une certaine épaisseur contenant les bâtiments et donc l'air contenu dans la surface. L'équation (eq. 1) n'est pas directement applicable. L'épaisseur de la surface implique la contribution d'autres flux. L'équation devient alors :

$$Q_R + Q_F = Q_H + Q_L + Q_C + \delta Q_S + \delta Q_A \quad \text{eq. 5}$$

Q_F : flux anthropogénique [W.m^{-2}]

δQ_S : flux stocké [W.m^{-2}]

δQ_A : flux advectif [W.m^{-2}]

Les flux convectifs, radiatifs et conduits sont la somme des flux explicités ci-dessus pour les surfaces élémentaires.

Le flux anthropogénique

Le flux anthropogénique est un terme de forçage qui correspond à l'ensemble des productions de chaleur relatives aux activités humaines ; principalement les émissions de chaleur des véhicules motorisés, des bâtiments, et des équipements urbains. Le flux anthropogénique est difficile à évaluer. Oke (1987) a mis en évidence des valeurs annuelles s'échelonnant de 3 W/m^2 à 117 W/m^2 .

Le flux stocké

Les phénomènes radiatifs et thermiques présentés ci-dessus conduisent à une accumulation de la chaleur au sein des matériaux et du sol (stockage). Cette énergie est restituée à l'atmosphère (déstockage) avec un décalage temporel, et principalement pendant la nuit.

Le flux advectif

Le flux advectif correspond à la quantité de chaleur fournie ou prélevée à la masse d'air circulant dans le volume fictif associé à l'élément surfacique urbain. En effet, l'air atmosphérique entre et sort de ce volume à débit quasiment constant mais à des températures différentes. Le flux advectif dépend donc de cet écart de température et de la capacité calorifique de l'air. Ce flux est souvent négligé.

3.2.1.3. Cas particulier des parois végétales de bâtiments

Dans le cas des parois de bâtiment végétalisées, (Malys 2012) a proposé le modèle actuellement implémenté dans l'outil SOLENE-microclimat. Ce modèle thermique consiste à considérer deux nœuds thermiques par élément de surface en plus de ceux de la paroi : un nœud pour le feuillage et un nœud pour l'air au sein du feuillage. Ce modèle repose sur trois bilans énergétiques ; le premier pour la végétation, le second pour l'air de la canopée et le troisième à la surface extérieure de la paroi de bâtiment qui supporte le feuillage. Dans la logique SOLENE-microclimat, chacun des de ces trois nœuds est en contact avec un composant différent de l'outil de couplage :

- La température de la surface extérieure T_{se} du bâtiment est utilisée pour calculer le flux conduit à travers la paroi et faire le bilan thermique du bâtiment.

- La température du feuillage T_f est utilisée dans le modèle radiatif pour le calcul des échanges GLO. Elle se substitue à la température de paroi que le feuillage masque. Les échanges GLO sont également calculés entre le feuillage et la paroi.
- La température de l'air au sein du feuillage T_a est considérée comme la température de surface extérieure du modèle aéralique et la température extérieure pour le modèle de bâtiment.

Pour le détail de ces trois bilans, le lecteur est invité à se référer à (Malys 2012). Dans ce qui suit nous allons présenter succinctement la logique des trois bilans ainsi que les paramètres propres à la végétation qui influent sur leurs différents termes.

Bilan énergétique sur la végétation

Le bilan énergétique sur la végétation s'écrit :

$$\delta Q_f = R_{CLO,g,f} + R_{GLO,ciel} + R_{GLO,urb} + R_{GLO,f-se} + Q_{H,f-a} + Q_{L,f} \quad eq. 6$$

δQ_f : flux stocké dans les feuilles dépend de l'épaisseur moyenne des feuilles d et du LAI

$R_{CLO,g,f}$: flux solaire absorbé par les feuilles, il s'agit rayonnement solaire global incident duquel on retire une fraction réfléchiée définie par l'albédo du feuillage ρ_f , et une partie transmise définie par le taux de transmission du feuillage τ_f .

$$R_{CLO,g,f} = R_{CLO,g}(1 - \rho_f - \tau_f) \quad eq. 7$$

τ_f dépend du LAI et d'un coefficient d'extinction k_s .

$R_{GLO,ciel}$: flux GLO net échangé avec le ciel

$R_{GLO,urb}$: flux GLO net échangé avec les autres surfaces urbaines vue par la surface végétale

$R_{GLO,f-se}$: flux GLO net échangé avec la surface extérieure de la paroi de bâtiment qui supporte la végétation.

$Q_{H,f-a}$: flux convectif échangé entre le feuillage et l'air qui circule en son sein. Ce flux convectif dépend de T_f , T_a et d'un coefficient d'échange convectif qui s'exprime en fonction du LAI et de la résistance aérodynamique du feuillage, elle-même dépendante de la vitesse du vent v .

$Q_{L,f}$: le flux latent prélevé au feuillage s'exprime comme le produit d'un taux d'évapotranspiration f , par l'évapotranspiration potentielle climatique ETP_c . ETP_c dépend de la résistance aérodynamique du feuillage r_a , et de sa résistance stomatique r_s . r_a dépend notamment de la vitesse du vent et r_s dépend notamment du LAI .

Bilan énergétique sur l'air compris dans la canopée végétale

Le bilan énergétique sur l'air de la canopée s'écrit :

$$\delta Q_a = Q_{H,f-a} + Q_{H,a-se} + Q_{H,a-air} \quad eq. 8$$

$Q_{H,a-se}$: le flux convectif entre l'air au sein du feuillage et la surface extérieure du bâtiment qui supporte le feuillage. Le coefficient d'échange dépend de la vitesse de l'air au sein de la canopée végétale.

$Q_{H,a-air}$: le flux convectif entre le feuillage l'air. Le coefficient d'échange dépend de a vitesse du vent.

Bilan énergétique à la surface extérieure de la paroi

Il s'agit du bilan énergétique à la surface extérieure du mur qui permet de déterminer les flux transmis à l'intérieur du bâtiment. Dans ce modèle, le rayonnement solaire global incident est filtré par la couche de végétation, et le mur échange par convection avec l'air de la canopée végétale (voir ci-dessus) et par rayonnement GLO avec le feuillage (voir ci-dessus).

Le bilan énergétique à la surface extérieure de la paroi s'écrit :

$$\delta Q_{se} = R_{CLO,se} - R_{GLO,f-se} - Q_{H,a-se} + Q_{C,se} + Q_{L,se} \quad eq. 9$$

Le rayonnement solaire incident atteignant la surface extérieure du bâtiment s'écrit :

$$R_{CLO,se} = \tau_F R_{CLO,g} \quad eq. 10$$

$Q_{C,se}$: le flux conduit à travers la paroi

$Q_{L,se}$: le flux latent à la surface extérieure du bâtiment, qui est nul dans le cas où il n'y a pas de substrat.

3.2.2. La modélisation du bilan énergétique à l'échelle du quartier

A l'échelle du quartier, les études sont généralement menées à l'aide de modèles décrivant explicitement les aménagements urbains (modélisation 3D), et modélisant leur impact local sur l'ensoleillement, le vent, la température et l'humidité de l'air.

Sans prétendre à l'exhaustivité, nous présentons succinctement dans cette section, les principaux modèles de bilan énergétique à l'échelle du quartier selon leur spécialité d'origine ; modèles thermo-radiatifs et modèles climatiques (c.à.d. reposant sur un modèle aérodynamique). Nous proposons conjointement des cas d'application de ces modèles permettant d'illustrer l'influence de la morphologie urbaine sur la performance énergétique du quartier.

3.2.2.1. Modèles thermo-radiatifs

Les modèles thermo-radiatifs sont des modèles initialement conçus pour le calcul des flux solaires dans des géométries urbaines complexes, tels que les modèles, SOLENE (Miguet 2000), Citysim (Robinson et al. 2009), ou encore SOLWEIG (Lindberg et al. 2008) et DART (Gastellu-Etchegorry et al. 1996). Ces modèles permettent notamment de calculer la température radiante moyenne, indicateur représentatif du confort extérieur, mais il existe des différences importantes entre eux. Par exemple SOLENE et Citysim permettent le calcul des températures de surface, alors que SOLWEIG s'affranchit du bilan thermique des parois en approximant les températures de surface à partir de la température de l'air et en fonction de l'exposition au soleil des surfaces.

Le logiciel SOLENE (Miguet 2000) est initialement un modèle de surface thermo-radiatif développé au laboratoire CRENAU (ENSA Nantes) qui effectue le bilan énergétique d'une surface urbaine. Comme nous l'avons détaillé précédemment (Bilan énergétique d'une surface urbaine), le logiciel SOLENE modélise explicitement les effets de la géométrie urbaine, mais également des propriétés optiques, radiatives, et thermiques des surfaces urbaines. Le modèle permet l'évaluation détaillée pour chaque facette de la scène urbaine du flux solaire direct, du flux solaire diffus, des inter-réflexions, des échanges GLO avec le ciel et avec la scène urbaine, du flux convectif, du flux conduit et de la température de surface à chaque pas de temps. Ces calculs nécessitent notamment le calcul initial des facteurs de vue du ciel pour chaque facette de la scène urbaine, ainsi que le calcul des facteurs de forme pour chaque couple de facettes prises deux

à deux. Le modèle de paroi initialement utilisé pour les facettes correspondant à l'enveloppe des bâtiments permettait simplement d'imposer une unique condition de température intérieure à l'ensemble des surfaces d'enveloppe de bâtiments de la scène urbaine. Puis (Bouyer 2009) a intégré dans SOLENE un modèle de simulation thermique dynamique multizone de bâtiment qui permet pour un unique bâtiment de la scène urbaine d'évaluer la température à l'intérieur du bâtiment ou ses besoins de chauffage ou de climatisation (dans ce cas avec une température imposée).

Citysim (Robinson et al. 2009) est un outil dont le périmètre est assez proche de celui de SOLENE. Il permet le calcul pour chaque facette de la scène urbaine des différents flux CLO et GLO, prenant en compte l'environnement urbain. Les échanges radiatifs au sein de la scène urbaine (CLO et GLO) sont résolus grâce à l'algorithme SRA (*Simplified Radiosity Algorithm*) (Robinson & Stone 2005). Le modèle de thermique de bâtiment implémenté dans Citysim est un modèle dynamique multizone. Les bâtiments de la scène urbaine sont simulés simultanément, en mettant à profit une description des bâtiments basée sur des archétypes. L'utilisateur a également la possibilité de modifier « à la main » les propriétés des bâtiments. Citysim intègre également un modèle d'éclairage naturel, permettant de réaliser des estimations des besoins d'énergie pour l'éclairage artificiel. Au-delà de la prise en compte des effets du contexte urbain sur le bilan énergétique des bâtiments, l'une des originalités de Citysim réside dans la prise en compte non déterministe des usages, les scénarios d'usage étant remplacés par des modèles stochastiques.

Le comportement thermo-radiatif de la surface urbaine à l'échelle du quartier a été étudié grâce à ce type de modèles. Ainsi Hénon et al. (2011) ont réalisé avec SOLENE une analyse détaillée des échanges thermo-radiatifs dans un quartier central de Marseille qui met en avant la complexité de ces échanges. Sur la base du modèle 3D du quartier réel, les auteurs mettent en évidence l'influence de la forme urbaine sur le bilan énergétique, et notamment :

- l'effet du piégeage radiatif dû aux inter-réflexions qui conduit à une augmentation de l'énergie solaire absorbée par la surface urbaine
- et l'influence sur le flux convectif du contexte urbain qui a la particularité de proposer de grandes surfaces d'échange (les façades) pouvant conduire à une augmentation des échanges convectifs en journée (selon les conditions d'ensoleillement).

Les auteurs étudient également l'influence du rapport d'aspect des rues (rapport de la hauteur des bâtiments sur la largeur de la rue) sur les flux CLO, GLO et convectifs. Pour une journée d'été, le flux CLO réfléchi, ainsi que les émissions GLO vers le ciel augmentent quand la hauteur des bâtiments diminue. S'agissant du flux convectif, la diminution de la hauteur des bâtiments a deux effets opposés ; 1. La surface des façades diminue ce qui réduit les échanges convectifs en journée par diminution de la surface d'échange, et 2. l'augmentation de l'ensoleillement au niveau du sol a tendance à augmenter la contribution des rues au flux de chaleur sensible.

Li et al. (2015) mettent en œuvre Citysim pour étudier le potentiel solaire de bâtiments résidentiels en milieu urbain et ce pour plusieurs classes de densité (faible, moyenne et élevée). Les auteurs s'intéressent à l'influence du rapport d'aspect des bâtiments (rapport de la longueur des bâtiments sur leur profondeur), de leur orientation et de la densité en plan sur les rendements de panneaux solaires photovoltaïques et thermiques (exprimés par m^2 de surface plancher). Les résultats montrent que pour les configurations testées, l'augmentation du rapport d'aspect du bâtiment tend à améliorer le potentiel solaire. En outre, il existe une gamme d'orientation préférentielle pour le rendement des panneaux PV. Cette étude montre également que malgré l'augmentation des ombres portées qui induit une réduction des rendements des

panneaux PV et ST, le scénario à haute densité permet de satisfaire aux besoins électriques et thermiques des bâtiments pour certains rapports d'aspect, et certaines orientations.

3.2.2.2. Modèles climatiques

Les modèles climatiques (ou modèles couplés thermo-radiatifs et aérauliques) sont des modèles qui réalisent en plus des bilans de surface, des bilans sur l'air environnant (bilan de masse, de chaleur et de quantité de mouvement). Dans cette classe de modèles, on peut notamment citer ENVI-met (Bruse 1999), SOLENE-microclimat (Bouyer et al. 2011) (Figure 8) et Coupled-Simulation (Chen et al. 2009) (Figure 9), qui permettent de calculer les flux radiatifs, les températures de surface, le champ de vitesse du vent, le taux d'humidité et la température de l'air dans une géométrie urbaine même complexe et en présence de végétation. La végétation est alors représentée comme un milieu poreux au vent et semi-transparent au rayonnement solaire. Les processus d'évaporation et de photosynthèse sont exprimés dans les bilans de masse et de chaleur. ENVI-met et Coupled-Simulation sont des modèles complets, qui intègrent des modèles pour tous les phénomènes physiques. Cette approche intégrée se fait au détriment de certains sous-modèles qui sont assez largement simplifiés. A contrario, SOLENE-microclimat est un exemple de couplage d'outils, entre un modèle thermo-radiatif et un modèle aéraulique.

ENVI-met est un modèle basé sur la dynamique des fluides et la thermodynamique, avec une résolution spatiale typique de 0,5m à 5m et une résolution temporelle de 1s à 10s. Le modèle est capable de simuler les écoulements autour des bâtiments, les processus d'échange de chaleur et d'humidité sur les surfaces urbaines, la turbulence, les transferts de masse et d'énergie entre la végétation, le sol et l'air, ainsi que la dispersion de particules et leurs réactions chimiques simples. Les principaux paramètres d'entrée comprennent les conditions météorologiques, les profils initiaux d'humidité et de température du sol, les structures et les propriétés physiques des surfaces urbaines et des plantes. ENVI-met peut également faire une estimation approximative de la performance énergétique d'un bâtiment. Cependant, une telle estimation serait adaptée à la conception amont des bâtiments car son principal domaine d'analyse est axé sur l'extérieur.

SOLENE-microclimat résulte principalement du développement par Bouyer (2009) d'une procédure de couplage de SOLENE avec le code de CFD FLUENT, permettant de prendre en compte explicitement les effets du contexte urbain sur le vent et donc sur les échanges convectifs et sur la température de l'air extérieur. Puis Malys (2012) a repris et perfectionné ce principe de couplage (désormais réalisé avec code_saturne, un autre logiciel de CFD). Malys (2012) a également incorporé à l'ensemble le bilan hydrique des surfaces, via notamment le développement de modèles de surface végétales. L'outil dans son état actuel s'appelle SOLENE-Microclimat. Cet outil permet donc l'étude très détaillée des effets de l'environnement urbain sur le microclimat local et également sur l'énergétique d'un bâtiment, et inversement l'étude de l'effet d'un bâtiment sur le microclimat local. Les principales limitations sont la complexité de mise en œuvre, les temps de calcul, ainsi que la limitation à l'étude d'un seul bâtiment de la scène urbaine. Le principe de la simulation couplée entre SOLENE (modèle thermo-radiatif) et un code de CFD repose sur une interaction à chaque pas de temps de calcul entre les deux outils numériques selon la description de la Figure 10.

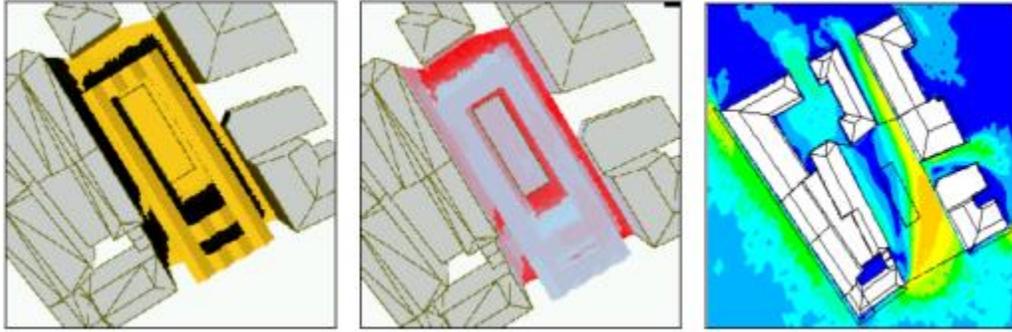


Figure 8 - Exemple de résultats obtenus avec SOLENE-microclimat (Robitu 2005) (flux solaire, température de surface, vitesse du vent)

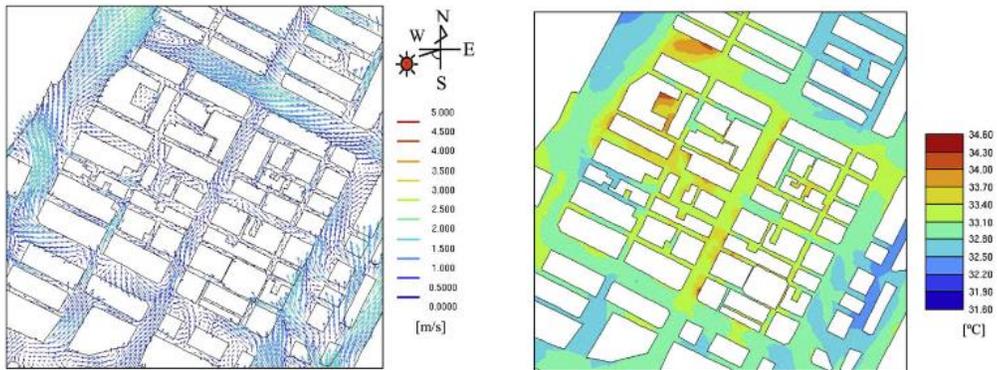


Figure 9 – Exemple de résultats obtenus avec “Coupled-Simulation” (Chen et al. 2009) (vitesse du vent, température d’air)

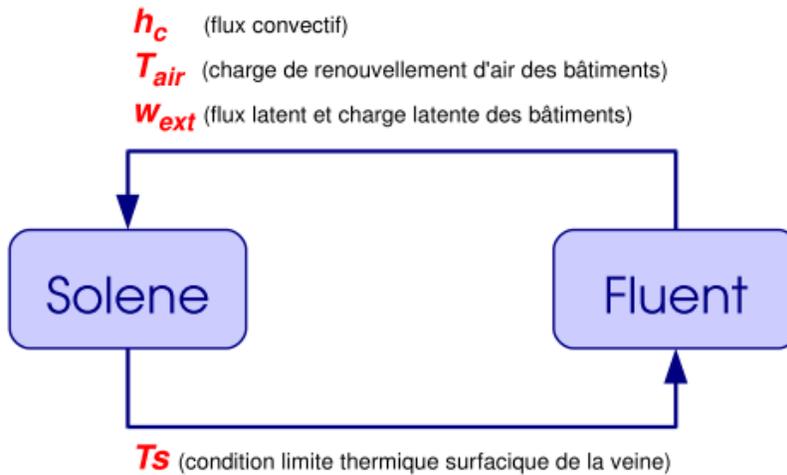


Figure 10 – Principe de la simulation couplée par (Bouyer 2009) qui utilisait alors Fluent pour la simulation aéraulique

En raison de la lourdeur du couplage en temps de calcul, plusieurs stratégies de couplage ont été proposées par (Bouyer et al. 2011) ;

- Couplage dynamique complet (*full dynamic coupling*) : itérations entre les deux outils jusqu'à convergence à chaque pas de temps
- Couplage « ping-pong » (*quasi dynamic coupling*) : une seule itération entre les deux outils à chaque pas de temps
- Couplage intermédiaire : non résolution des équations du mouvement dans le code CFD pendant le couplage, seulement celles de transport. Cela nécessite une initialisation complète (résolution de l'ensemble des équations) grâce à laquelle les champs de vitesses de vent et de turbulence sont pré-calculés pour toutes les directions de vent. Ensuite à chaque pas de temps de simulation, ces champs sont considérés constants et seules les équations de transport (énergie et humidité) sont résolues.

Ces modèles climatiques avaient à l'origine vocation à permettre l'évaluation de l'influence de l'environnement urbain (y.c. l'influence des bâtiments) sur les conditions microclimatiques locales. Dans ce cadre, Musy et al. (2012) liste les évolutions nécessaires auxquelles ces outils doivent faire face et ce pour répondre à la nécessité d'évaluation de techniques alternatives d'aménagement :

- La présence de la végétation, le type de végétation, sa localisation et son mode de gestion (intensive ou extensive)
- Les systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales
- Les matériaux constructifs spécifiques pour le traitement des îlots de chaleur urbain
- La forme urbaine (orientation, densité, ...) sur laquelle un travail spécifique de conception peut être mené avec des objectifs de consommation énergétique ou de confort

De plus en plus, ces modèles apparaissent également comme une des options pour l'évaluation des effets de la morphologie urbaine et de l'aménagement sur les consommations énergétiques des bâtiments.

Ainsi Malys et al. (2015) proposent une étude détaillée de l'influence de différentes méthodes de couplage sur les effets calculés du microclimat urbain sur la consommation énergétique d'un bâtiment (et donc de l'influence de l'environnement urbain et de ses modes de prise en compte dans les simulations). Cette étude se base sur le couplage entre SOLENE-microclimat et code_saturne (CFD). Le bâtiment considéré est un bâtiment résidentiel de 5 niveaux construit à Nantes dans les années 60. Deux variantes sont considérées selon que le bâtiment est isolé ou non. Les auteurs proposent une étude préliminaire sur l'influence relative des flux convectifs et des échanges radiatifs GLO. Cette étude met en œuvre trois paramétrisations du coefficient d'échange convectif (1. homogène et constant, 2. calculé à chaque pas de temps à partir de la vitesse du vent donnée par le fichier météo, et 3. même dépendance temporelle que précédemment et variations spatiales en fonction de la hauteur), ainsi que trois modes de prise en compte des échanges GLO au sein de la scène urbaine (1. mode conventionnel de calcul de SOLENE-microclimat (cf. section 3.2.1.1), 2. calcul des échanges GLO avec le ciel à partir d'une loi empirique basée sur la température de l'air, et 3. pas de prise en compte des échanges GLO au sein de la scène urbaine). Les simulations sont réalisées sur la saison de chauffe (15 septembre – 15 avril). Les résultats montrent que le mode de calcul du coefficient d'échange convectif a une influence très limitée sur le calcul des besoins énergétiques moyens du bâtiment. En effet, la valeur moyenne des coefficients d'échange convectif locaux était proche dans toutes les simulations, et l'étude montre donc que la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale de ce coefficient a peu d'impact sur la valeur intégrée qu'est la consommation énergétique. Par contre la prise en compte des variations verticales du coefficient d'échange convectif permet de représenter plus correctement les températures de surfaces extérieures, ainsi que la répartition des

besoins thermiques de chaque étage. En matière d'échanges GLO, le calcul simplifié des échanges GLO avec le ciel conduit à une augmentation de 20% des besoins énergétiques calculés, et la prise en compte des échanges GLO au sein de la scène urbaine induit une diminution significative des besoins thermiques. Les auteurs concluent de cette étude préliminaire que les échanges radiatifs avec la scène urbaine ou le ciel ont un effet plus important sur le comportement thermique d'un bâtiment que les flux convectifs. Ceci justifie la création d'une représentation géométrique des bâtiments et de leur environnement pour calculer ces échanges. En revanche, la faible sensibilité de l'évaluation de la demande d'énergie aux variations spatio-temporelles de la vitesse du vent suggère que le couplage dynamique complet des simulations énergétiques de bâtiment et des simulations d'écoulement d'air n'est pas nécessaire. Dans une seconde analyse, les auteurs étudient l'effet de différentes méthodes de couplage. Trois options de prise en compte du vent sont étudiées ; 1. vitesse du vent du fichier météo, 2. vitesse du vent ajustée en fonction de l'altitude, et 3. vitesse du vent obtenue via CFD et via l'approche de couplage intermédiaire évoquée plus haut. Trois options sont également considérées pour la température de l'air ; 1. température du fichier météo, 2. température « urbanisée » obtenue via l'écriture d'un bilan énergétique sur une « zone de contrôle » englobant la scène urbaine, et 3. température obtenue via la CFD. En hiver, le couplage avec la CFD pour l'obtention des températures d'air ou la prise en compte d'une température urbanisée a peu d'influence sur l'évaluation des consommations énergétiques par rapport au cas de référence. Le mode de prise en compte du vent (et donc de calcul du coefficient d'échange convectif) est influent pour le bâtiment non-isolé, mais n'a pas d'influence significative dans le cas du bâtiment isolé. En été, l'étude montre que le couplage avec la CFD semble nécessaire dans le cas de bâtiments non-isolés.

3.3. MODELISATION DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DES BATIMENTS EN MILIEU URBAIN

L'évaluation énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier peut être envisagée à partir de deux grandes familles d'approches ; 1. la modélisation physique dont l'origine se situe dans la modélisation énergétique détaillée à l'échelle du bâtiment, et 2. La modélisation statistique qui trouve sa source dans la modélisation énergétique à l'échelle régionale ou nationale. Ces deux familles d'approches présentent des limites pour une application à l'échelle du quartier. La descente d'échelle à partir de modèles statistiques ne permet pas de rendre compte des spécificités d'un quartier. La montée en échelle, à partir de modèles physiques de bâtiment, bien qu'elle soit théoriquement possible, présente trois limitations majeures :

- La difficulté de la prise en compte des effets microclimatique locaux (cf. section précédente)
- Le besoin important de données concernant les bâtiments
- La consommation de ressources (expertise, temps, argent)

Ces limitations rendent les approches existantes difficilement applicables aux phases amont de conception d'un projet d'aménagement. Récemment, les deux types d'approches ont commencé à fusionner en méthodes hybrides ayant pour ambition de permettre une évaluation énergétique des quartiers (de quelques dizaines à quelques milliers de bâtiments) adaptée en termes de données d'entrées et de coût de mise en œuvre pour en faire des outils d'aide à la décision pertinents pour les concepteurs et planificateurs de la ville.

3.3.1. Simulation énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier

Reinhart & Cerezo Davila (2016) proposent une revue de ces approches nouvelles, qu'ils nomment UBEM, pour *Urban Building Energy Modelling*, puisqu'il s'agit principalement d'urbaniser des modèles énergétiques de bâtiments en les rendant compatibles en termes de données d'entrée avec l'échelle quartier, et en améliorant la prise en compte dans ces modèles du contexte urbain.

Les auteurs mettent en avant deux critères pour catégoriser ces modèles, d'une part la nature des données d'entrée, d'autre part le type de modèle utilisé pour la simulation thermique.

S'agissant des données d'entrée, comme pour les modèles à l'échelle bâtiment, plusieurs jeux de données sont nécessaires ; les données météo, la géométrie de la scène urbaine, les données de construction des bâtiments, et les scénarios d'usage des bâtiments. Concernant les données météo, la particularité des modèles urbains réside dans la tendance à utiliser des données météo urbanisées, incorporant notamment une prédiction des vents au sein de la scène urbaine, ou l'effet de l'ICU. Cette urbanisation des données météo n'est pas systématique. La géométrie de la scène urbaine est, elle, souvent issue de données SIG combinées avec des données de hauteur des bâtiments, qui permettent de construire des plans masse 2,5D (il ne s'agit pas d'une véritable 3D car les bâtiments sont obtenus par extrusion de leur emprise au sol et toutes les géométries ne peuvent pas être obtenues ainsi). Les auteurs notent également la démocratisation des modèles 3D de villes au format CityGML vers lequel de nombreux projets de recherche se tournent actuellement. Il est intéressant de remarquer que ces modèles 2,5D ou 3D de la géométrie urbaine contiennent la même information que les plans masses classiquement produits par les architectes-urbanistes dans les phases amont des projets d'aménagement. Enfin les propriétés des bâtiments (en termes de matériaux et de systèmes) ainsi que les scénarios d'usage doivent être définis. La particularité des UBEM par rapport aux modèles de bâtiment, consiste à travailler sur la base d'archétypes de bâtiments, une approche qui provient des modèles énergétiques statistiques à la grande échelle.

Reinhart & Cerezo Davila (2016) proposent trois critères pour caractériser les différents modèles thermiques utilisés pour évaluer les archétypes de bâtiments :

- Le modèle peut être statique ou dynamique. Les modèles statiques (travaillant en régime permanent) sont réputés suffisants pour l'évaluation des besoins de chauffage, par contre ils sont clairement insuffisants pour évaluer les besoins de climatisation pour les climats concernés par cette thématique. Le cas échéant un modèle dynamique s'avère nécessaire.
- Le modèle peut être monozone ou multizone. Le choix du multizone induit une modélisation plus complexe et des temps de calcul plus longs, mais peut s'avérer incontournable à partir d'un certain niveau de détail des choix de conception à étudier et notamment lorsque l'on étudie des bâtiments à usages mixtes par exemple.
- Enfin, les modèles se différencient par la manière dont ils prennent en compte les interactions avec le contexte urbain; 1. absence de prise en compte, 2. prise en compte des seuls effets de masques sur les apports solaires, et 3. Prise en compte d'autres phénomènes physiques (effet des masques sur les apports solaires diffus, inter-réflexions au sein de la scène urbaine, échanges GLO au sein de la scène urbaine, conditions locales de vent au sein de la scène urbaine).

Pour ce qui est de la prise en compte de l'environnement urbain, la majorité des outils soit n'en tiennent pas compte soit se limitent aux effets de masque sur le flux solaire direct, et éventuellement sur le flux solaire diffus.

3.3.2. Approches de modélisation des interactions entre le bâtiment et son contexte urbain

Nous avons présenté dans la section 3.2.2 les différentes approches de modélisation du bilan énergétique de la surface urbaine à l'échelle du quartier. La vocation initiale de ces modèles n'est pas la modélisation de la performance énergétique des bâtiments, mais la simulation des conditions microclimatiques locales. Du point de vue de la thermique du bâtiment, ces approches permettent cependant de préciser les sollicitations microclimatiques locales auxquelles les bâtiments sont soumis, et permettent ainsi théoriquement d'améliorer la fiabilité des résultats des évaluations énergétiques de bâtiments. Nous avons ainsi vu que certains de ces modèles commencent à incorporer des modèles de thermique de bâtiment.

A l'opposé, dans cette section nous nous intéressons aux approches dont l'origine réside dans la modélisation énergétique des bâtiments et qui cherchent à intégrer les effets de l'environnement urbain. Cette prise en compte de l'environnement urbain peut se faire soit via le développement de modèle adhoc permettant de représenter certains phénomènes physiques, soit via le couplage avec des modèles thermo-radiatifs ou climatiques. Nous proposons ci-dessous quelques exemples d'approches de modélisation.

Comme mentionné précédemment, la prise en compte des masques solaires est le niveau minimal de prise en compte de l'environnement urbain. SimStadt (Nouvel et al. 2015) est une plateforme d'évaluation énergétique des quartiers qui propose le couplage d'un modèle de bâtiment avec un outil radiatif pour le traitement des masques solaire et des inter-réflexions. S'agissant du traitement des flux CLO, SimStadt propose trois types d'approches qui correspondent à une gradation dans la prise en compte de l'environnement urbain ; i. chaque bâtiment est considéré de manière isolée, ii. prise en compte des masques grâce à un algorithme de lancer de rayons, et iii. prise en compte des masques et des multiréflexions grâce à l'algorithme SRA (*simplified radiosity algorithm*). Concernant la modélisation thermique des bâtiments, pour le calcul des besoins de chauffage, une approche statique est mise en œuvre. Il s'agit d'un bilan énergétique mensuel (ISO 13790) appliqué à chaque bâtiment. SimStadt est donc un modèle très simple tant du point de vue de la modélisation énergétique du bâtiment que du point de vue de la prise en compte de l'environnement urbain.

Les échanges GLO au sein de la scène urbaine sont souvent pris en compte de manière simplifiée dans les logiciels de simulation thermique de bâtiment. En effet dans EnergyPlus³ par exemple, les échanges radiatifs GLO pour une surface du bâtiment d'étude sont calculés à partir de la sommation d'échanges avec le sol, le ciel et l'air ambiant (eq. 11). Les coefficients d'échange radiatif pour chacune de ces variables environnementales sont calculés selon eq. 12 où σ est la constante de Stefan-Boltzmann et ϵ l'émissivité de la surface. L'hypothèse majeure de cette approche est que les surfaces du bâtiment modélisé et celles des bâtiments adjacents sont considérées à une température égale, ainsi les échanges radiatifs entre elles sont négligés.

$$Q_{GLO,EnergyPlus} = h_{r,sol}(T_{surf} - T_{sol}) + h_{r,ciel}(T_{surf} - T_{ciel}) + h_{r,air}(T_{surf} - T_{air}) \quad eq. 11$$

$$h_{r,variable} = \frac{\epsilon\sigma(T_{surf}^4 - T_{variable}^4)}{T_{surf} - T_{variable}} \quad eq. 12$$

³ <http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/engineering-reference/page-020.html>

Pour surmonter cette limitation d'EnergyPlus, Miller et al. (2015) ont proposé une approche de co-simulation entre EnergyPlus (pour la thermique du bâtiment) et Citysim (pour le calcul des échanges radiatifs au sein de la scène urbaine). En comparant des résultats de simulations EnergyPlus et de simulations couplées, les auteurs ont observé des différences pouvant atteindre 36% sur l'évaluation des besoins de chaud et 11% pour l'évaluation des besoins de froid.

Certaines approches se concentrent ensuite sur la prise en compte de l'ICU, sans toutefois simuler le champ de température d'air extérieur, mais en urbanisant les données météo en fonction des caractéristiques du quartier d'étude.

C'est précisément la fonction du modèle UWG (*Urban Weather Generator*) (Bueno et al. 2013) qui permet de convertir un fichier météo correspondant à une station météo rurale, en un nouveau fichier correspondant au contexte urbain étudié et prenant en compte l'effet d'ICU au pas de temps horaire. UWG couple un modèle atmosphérique à méso-échelle avec un moteur de simulation de bâtiment. Le résultat est un fichier météo à utiliser directement en entrée des modèles de simulation de bâtiments. Pour obtenir le fichier météo, UWG a besoin d'une interprétation paramétrique de la ville ou du quartier. Cette description paramétrique contient des données relatives aux matériaux (propriétés thermiques et optiques des surfaces, couverture végétale, etc.), aux bâtiments (gains internes, températures de consigne, etc.), au quartier d'étude (densité bâtie, hauteur moyenne des bâtiments, densité de façades, densité d'espaces verts, etc.), et à la localisation (latitude, longitude, etc.).

UMI (*Urban Modeling Interface*) (Reinhart et al. 2013) est une plateforme d'évaluation énergétique à l'échelle du quartier qui met en œuvre le modèle UWG. Cette plateforme est un plug-in de l'environnement de modélisation paramétrique 3D Rhino-Grasshopper. Elle permet notamment de paramétrer et de lancer, pour un quartier, des simulations EnergyPlus (pour l'évaluation des besoins thermiques) et Daysim (pour l'éclairage naturel). S'agissant de l'évaluation des besoins et consommations de chauffage et climatisation des bâtiments, la plateforme fait donc appel au moteur de simulation thermique dynamique multizone EnergyPlus, et propose une prise en compte de l'influence de l'environnement urbain à deux niveaux. D'une part, au cours de chaque simulation de bâtiment individuel, les effets de masque sur le flux solaire direct et sur le flux solaire diffus sont pris en compte. D'autre part, l'effet d'ICU est pris en compte en « urbanisant » le fichier météo d'entrée grâce au modèle UWG. Il s'agit ici d'une approche de couplage très simple puisque n'agissant que sur le fichier météo initial.

UWG est également mis en œuvre par Palme et al. (2017) dans un couplage avec le moteur de simulation thermique dynamique TRNSYS. Les auteurs montrent grâce à cette approche appliquée au stock de bâtiments résidentiels de quatre villes côtières d'Amérique du Sud, que la prise en compte de l'ICU dans les simulations induit une augmentation des besoins énergétiques comprise entre 15% et 200%.

Enfin les approches de couplages entre modèles climatiques ou code de CFD et modèles de thermique du bâtiment se multiplient dans le but d'étudier, à l'échelle du quartier ou de l'îlot, les effets du microclimat urbain sur les besoins énergétiques des bâtiments.

Ainsi Yang et al. (2012) proposent une méthode de couplage entre ENVI-met et EnergyPlus (Figure 11). Ce couplage à sens unique d'ENVI-met vers EnergyPlus est basé sur les principes suivants :

- Evaluation des flux CLO : les flux CLO direct, diffus et inter-réfléchis sont évalués directement par EnergyPlus. Cependant ces calculs font appel à des paramètres évalués par ENVI-met de manière plus précise que dans EnergyPlus ; la transmission solaire de la végétation et l'albédo des sols.
- Evaluation du flux convectif aux surfaces extérieures du bâtiment : le calcul du coefficient d'échange convectif pour EnergyPlus est basé sur le calcul par ENVI-met des champs de vitesse et de température d'air autour du bâtiment.
- Evaluation des flux GLO : le calcul des échanges GLO avec l'environnement urbain est basé sur les températures de surfaces évaluées via ENVI-met, alors que le mode de calcul classique d'EnergyPlus consiste à considérer l'ensemble des surfaces urbaines à la même température que l'air ambiant.
- Evaluation des transferts de chaleur et d'humidité par infiltration : le calcul se fait sur la base des champs d'humidité et de température de l'air évalués par ENVI-met.

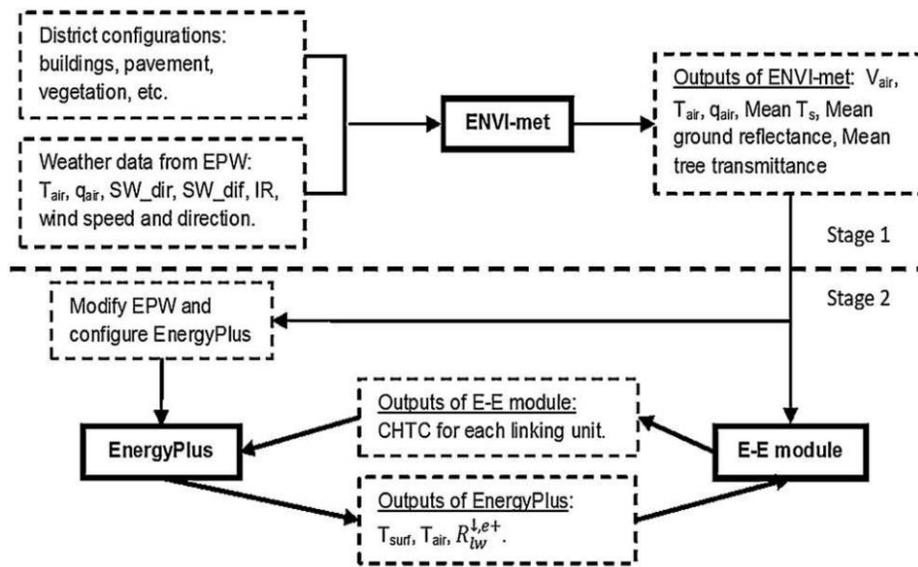


Figure 11- Schéma de couplage entre ENVI-met et EnergyPlus (Yang et al. 2012)

Les auteurs analysent la prise en compte individuelle ou collective des différentes sollicitations microclimatiques résultant de la prise en compte de l'environnement urbain, sur les besoins de climatisation d'un immeuble résidentiel d'un quartier central de Guangzhou (Chine). En comparaison avec le bâtiment en site dégagé, la prise en compte des masques solaires (bâtiments et arbres) induit une diminution de 18,8% des besoins de froid. Lorsque les arbres sont retirés de la simulation, il est intéressant de noter que cela n'a quasiment pas d'effet sur les besoins de froid. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation des apports solaires est compensée par la diminution de l'humidité de l'air. La prise en compte des champs de vitesse et de température d'air locaux pour le calcul des échanges convectifs induit une diminution limitée de 0,8% des besoins de froid, du fait d'une augmentation des flux convectifs. La prise en compte des températures de surface pour le calcul des échanges GLO au sein de la scène urbaine induit une augmentation de 1,1% des besoins de froid. Enfin une augmentation de 9,4% des besoins de froid est obtenue lorsque l'on considère l'effet sur les infiltrations de l'air extérieur plus chaud et plus humide du fait de l'effet d'îlot de chaleur urbain et de la présence de végétation. Lorsque l'ensemble des

effets de l'environnement construit et naturel sont pris en compte, on observe une réduction de 10,6% des besoins de froid pour ce cas d'étude.

Yi & Peng (2014) et Ramesh & Lam (2015) mettent en œuvre le même type de couplage entre ENVI-met et EnergyPlus. Yi & Peng (2014) l'utilisent pour étudier le risque de surchauffe estivale pour un bâtiment ventilé naturellement en 2012 et en 2050 (en mettant en œuvre un scénario de changement climatique). Ramesh & Lam (2015) utilisent deux jeux de données météo pour évaluer via EnergyPlus des besoins de froid d'un bâtiment de bureaux dans son contexte urbain. Ils utilisent d'une part des données météo classiques qui proviennent d'une station météo en site péri-urbain proche, et d'autre part des données mesurées à proximité du bâtiment. La prise en compte des conditions climatiques locales (température et humidité de l'air) induit une diminution de 4% des charges de climatisation simulées. Pour aller plus loin dans cette démarche de prise en compte de l'environnement urbain, les auteurs proposent également une méthode de couplage unidirectionnel depuis ENVI-met vers EnergyPlus. Dans cette approche, les résultats de simulation d'ENVI-met sont utilisés d'une part pour urbaniser le fichier météo d'entrée d'EnergyPlus (température et humidité de l'air), et d'autre part pour calcul les coefficients de convection de chacune des surfaces du bâtiment (sur la base notamment des vitesses de vent évaluées par ENVI-met).

Dorer et al. (2013) étudient également l'effet de la prise en compte de l'environnement urbain sur les besoins de froid d'un bâtiment hypothétique dans une configuration de rue canyon et pour le climat de Basel (Suisse). Le modèle de bâtiment utilisé est TRNSYS qui permet la prise en compte des échanges GLO avec la rue et les bâtiments (sous réserve que les rues soient modélisées comme des patios à ciel ouvert). La prise en compte de l'effet de l'environnement urbain sur les flux convectifs est permise par le calcul des coefficients de convection basé sur des lois empiriques déduites de campagnes de simulations CFD sur des canyons urbains. La prise en compte de l'îlot de chaleur urbain, se fait via l'utilisation de données mesurées pour la ville de Basel. Les auteurs comparent les résultats obtenus pour le bâtiment isolé ainsi que pour trois configurations de rues canyons, et ce pour plusieurs types de simulations ; 1. Prise en compte des effets radiatifs GLO, 2. Prise en compte des effets radiatifs et convectifs, et 3. Ajout de l'îlot de chaleur urbain (Figure 12). Les besoins de froid pour le bâtiment isolé sont beaucoup plus faibles. Pour les canyons les besoins de froid augmentent avec la largeur de la rue. Dans les canyons étroits la demande de refroidissement est plus faible en raison d'une diminution du rayonnement solaire. Le calcul des coefficients d'échange convectif basés sur la CFD devient important pour les canyons étroits. L'ICU augmente considérablement les besoins de froid dans tous les cas.

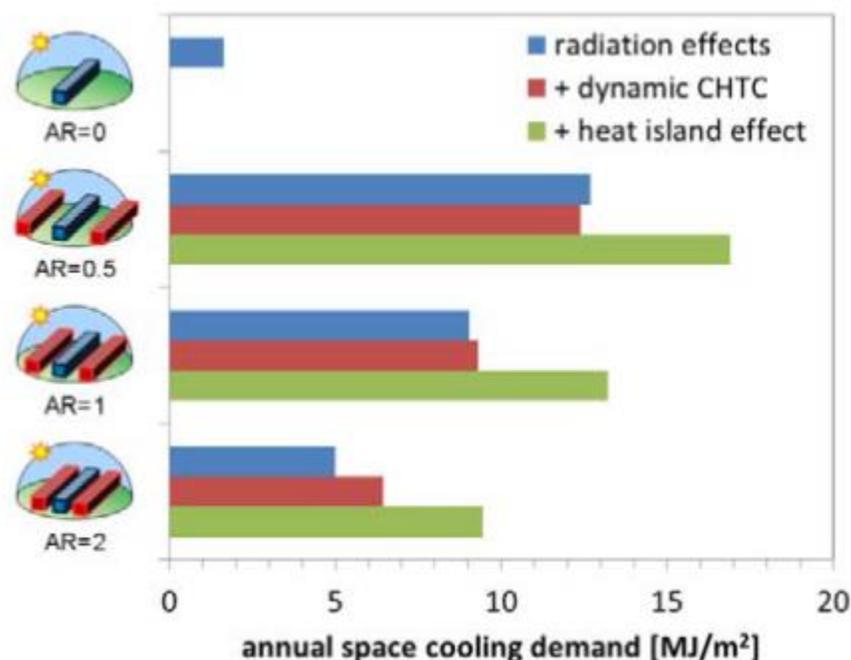


Figure 12 - Besoins annuels de froid pour différentes approches de prise en compte de l'environnement urbain, et pour plusieurs configurations de rue canyon (Dorer et al. 2013)

Le modèle EnvibatE (Gros 2013; Gros et al. 2014) est un exemple de modèle de couplage développé spécifiquement dans le but de travailler avec de grands quartiers. Il permet via un modèle simplifié de thermique du bâtiment, de déterminer par exemple les besoins de chauffage par étage de l'ensemble des bâtiments composant un quartier. EnvibatE couple la modélisation du microclimat et la modélisation des besoins énergétiques des bâtiments d'un quartier pour une saison ou une année. Pour ce faire, la description détaillée des processus physiques n'est pas adaptée, et EnvibatE utilise un modèle réduit pour décrire le comportement thermique des bâtiments, et un modèle de type zonal pour modéliser les champs de température de l'air extérieur. Dans ce cadre, SOLENE est utilisé pour calculer la répartition du rayonnement solaire direct et diffus dans le quartier, et le logiciel QUIC-URB est utilisé pour déterminer le champ de vitesse d'air. Ce modèle a été appliqué au quartier Pin Sec à Nantes dans le but d'étudier l'influence des peintures réfléchives (*cool painting*) sur les besoins de climatisation des bâtiments (Gros et al. 2014). Quatre cas ont été simulés ; sans peintures réfléchives et avec peintures réfléchives sur les façades seules, les toits seuls, les façades et les toits. Les résultats mettent en évidence la réduction des températures de surface due aux peintures réfléchives ; jusqu'à moins 10°C sur les façades et moins 20°C sur les toits. Le modèle permet également de mettre en évidence l'impact des peintures réfléchives sur le microclimat induisant une diminution de l'effet d'ICU. Enfin, quel que soit le mode d'application de la peinture réfléchive (en façade ou en toiture), les besoins de climatisation sont diminués d'environ 80% en moyenne sur le quartier.

Nous avons présenté dans cette section les différentes approches existantes pour modéliser le microclimat urbain à l'échelle du quartier ainsi que pour évaluer son impact sur les consommations énergétiques des bâtiments. Ces approches reposent sur des outils dont la mise en œuvre nécessite des ressources, de l'expertise et un niveau de détail qui ne sont généralement pas accessibles en phase amont de conception des projets d'aménagement. Dans la section suivante nous présentons un autre type d'approches,

développé spécifiquement pour les évaluations simplifiées de tissus urbains, il s'agit des approches morphologiques.

3.4. APPROCHES MORPHOLOGIQUES DES POTENTIELS BIOLClimATIQUES A L'ECHELLE DU QUARTIER

3.4.1. Formes urbaines et problématiques environnementales

Dans un ouvrage extrêmement détaillé, intitulé *Les Villes et les Formes*, Salat (2011), présente la question de la morphologie urbaine dans toute sa complexité et détaille ces interactions avec un grand nombre de thématiques de la ville durable, telles que le microclimat urbain, l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, la dimension humaine, ou encore les déplacements et les transports. L'auteur insiste sur le fait que la morphologie urbaine a notamment une importance cruciale sur l'efficacité environnementale et énergétique des villes. Par ailleurs il présente la forme urbaine comme le substrat physique du système urbain global mettant en jeu des faisceaux de détermination, engagés dans des boucles de rétroaction, dont même l'analyse systémique ne peut épuiser la complexité. L'on comprend dès lors que l'étude de la performance des formes urbaines est un objectif pertinent et utile, même s'il serait illusoire de vouloir procéder à une analyse holistique de la durabilité urbaine par le seul biais de la forme urbaine. L'auteur propose de penser la morphologie urbaine comme une déclinaison de six strates, qui superposées permettent d'appréhender l'ensemble des composantes de la ville :

- La première strate correspond aux personnes et aux activités
- La deuxième strate correspond au réseau de rue et à la trame viaire de la ville
- La troisième strate correspond au parcellaire qui joue un rôle déterminant dans la forme du bâti
- La quatrième strate comprend la topographie et le relief du site
- La cinquième strate correspond à l'utilisation des sols et à la répartition des activités
- La sixième strate appréhende la ville en trois dimensions

Dans notre recherche et donc dans l'état de l'art que nous proposons ci-dessous sur les formes urbaines, nous nous concentrons sur cette sixième strate, celle qui permet l'étude des facteurs climatiques (soleil, vent, température de l'air) intégrée à l'étude morphologique du bâti. Néanmoins des considérations en lien avec les autres strates seront abordées, notamment parce que la trame viaire, le parcellaire et l'utilisation des sols sont des éléments qui déterminent assez largement la ville en trois dimensions, et les types de surfaces urbaines.

A ce stade, il est utile de préciser la terminologie que nous employons par la suite. Huang (2010) met en avant le fait que la morphologie urbaine est définie différemment selon les disciplines qui la considère (économie, sociologie, architecture, climatologie etc.). Dans notre recherche nous étudions la morphologie urbaine notamment du point de vue de la climatologie urbaine, et en ce sens nous nous concentrons sur deux aspects de la forme urbaine ; la géométrie et la nature des surfaces urbaines (propriétés optiques, thermo-radiatives et évaporatives). Par la suite nous proposons d'employer indifféremment les termes de forme urbaine et de morphologie urbaine.

Comme nous l'avons vu au travers de la présentation des approches de modélisation en physique urbaine, la morphologie urbaine détermine fortement le microclimat urbain et donc les sollicitations climatiques auxquelles sont soumis les bâtiments. Les interactions entre le climat et la forme urbaine sont nombreuses et complexes. Elles sont déterminées par le climat local (position du soleil, température et humidité de

l'air, vitesse et direction du vent incident), ainsi que par les caractéristiques physiques et géométriques du tissu urbain ; géométrie (y compris arbres), propriétés radiatives des surfaces, propriétés thermiques des matériaux de surface, ou encore propriétés évaporatives et optiques de surfaces végétales. Ces différents paramètres conditionnent les différents flux du bilan énergétique de la surface urbaine.

Du point de vue du bâtiment, la morphologie urbaine a à la fois des effets directs et indirects sur ses sollicitations climatiques. Les seuls effets directs que l'on peut isoler concernent les différents flux CLO (flux solaire direct, diffus et inter-réfléchi) qui ne sont déterminés que par la position du soleil, la géométrie et la nature des surfaces. L'ensemble des autres flux à la surface extérieure de la canopée urbaine, c'est-à-dire les flux GLO, les flux convectifs et les flux latents sont régis notamment par l'évolution des températures de surface, par la température de l'air et la vitesse du vent. Or, ces trois variables sont intégrées dans des boucles de rétroaction entre surface urbaine et atmosphère. La morphologie urbaine modifie le microclimat urbain (température et humidité de l'air, vent, températures de surface) qui détermine les différents flux énergétiques à la surface urbaine, et ces flux influencent également le microclimat urbain.

La morphologie urbaine est un facteur primordial et crucial pour la performance énergétique urbaine, mais n'est bien entendu pas le seul facteur. En effet, comme explicité par Ratti et al. (2005), les consommations énergétiques des bâtiments doivent être abordées par une décomposition en facteurs qui sont autant de leviers d'action à exploiter. Baker & Steemers (2000) ont spécifié ce concept pour la ville grâce à la décomposition en facteurs présentée Figure 13. Les auteurs soulignent que la quantification de la contribution de l'interaction climat/forme urbaine à l'efficacité énergétique ne fait pas l'objet d'un consensus scientifique, mais que cependant elle est déterminante puisqu'elle conditionne fortement les possibilités de mobiliser les autres leviers de manière plus ou moins optimale.



Figure 13 - Facteurs affectant les consommations d'énergie des bâtiments (Baker & Steemers 2000)

3.4.2. Indicateurs morphologiques et morpho-climatiques

Du fait de la grande complexité des interactions entre forme urbaine climat et énergie, et de la lourdeur de mise en œuvre des approches de modélisation présentées précédemment, de nombreuses recherches sont consacrées au développement d'indicateurs morphologiques et/ou morpho-climatiques ayant pour objectif de caractériser les relations entre forme urbaine, climat et énergie. Les indicateurs morphologiques sont des indicateurs basés uniquement sur la description géométrique du milieu urbain et à la nature de ses surfaces, alors que les indicateurs morpho-climatiques combinent des paramètres relatifs à la forme urbaine et à ses performances climatiques et environnementales.

Les questions de densité revêtent une importance particulière en matière de description de la forme urbaine du fait de son omniprésence dans le débat public. On oppose en effet souvent l'étalement urbain, qui consomme les terres agricoles et conduit à une intensification de la pollution des milieux récepteurs (air, sol et milieux aquatiques) et à des risques hydrologiques, à la densification qui, si elle n'est pas correctement organisée, génère une qualité de vie inacceptable pour les citoyens (Musy et al. 2012). Les indicateurs de densité ont été utilisés de longue date pour tenter de caractériser la forme urbaine mais ne font pas consensus et n'ont pas véritablement prouvé leur efficacité pour décrire pertinemment la forme

urbaine alors même qu'ils sont couramment utilisés dans le cadre de la planification urbaine, de la programmation des opérations d'aménagement ou encore de l'évaluation des tissus urbains existants (Berghauser Pont & Haupt 2007). Il existe d'ailleurs de nombreuses définitions de la densité, telles que le nombre de logement par hectare, le coefficient d'emprise au sol (CES, ratio de la somme des emprises au sol des bâtiments sur l'aire de la zone urbaine), ou encore le coefficient d'emprise au sol (COS, ratio du total des surfaces planchers construites sur l'aire de la zone urbaine) qui mettent l'accent sur des thématiques différentes. In fine la densité, quelle que soit la définition considérée, ne permet pas de caractériser la forme urbaine, ainsi Berghauser Pont & Haupt (2007) ont par exemple mis en évidence (Figure 14) que des formes urbaines très différentes, et présentant des performances environnementales très différentes, peuvent présenter le même COS.

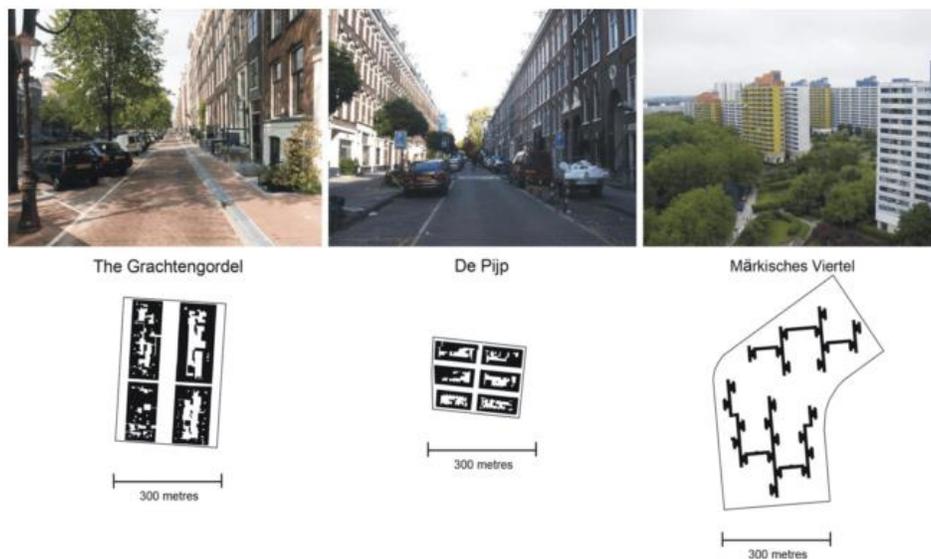


Figure 14 - Trois tissus urbains présentant le même coefficient d'occupation des sols mais des formes urbaines très différentes (Berghauser Pont & Haupt 2007)

En réponse à ces limitations liées à la densité, et partant du constat que le seul COS (*Floor Space Index*, FSI en anglais) ne permet pas de différencier efficacement les formes urbaines, Berghauser Pont & Haupt (2005) proposent une nouvelle définition multivariable de la densité, qui permet de faire le lien entre densité et forme urbaine. Les auteurs introduisent trois variables supplémentaires pour décrire le bâti ;

- Le coefficient d'emprise au sol (*Ground Space Index*, GSI en anglais) qui décrit l'étalement du bâti
- Le ratio d'espace ouvert (*Open Space Ratio*, OSR en anglais) qui décrit l'intensité d'usage des zones non-construites
- Le nombre moyen de niveaux (*Layer*, L en anglais), qui décrit la hauteur moyenne du bâti

$$GSI = \frac{F}{A} \qquad FSI = \frac{B}{A} \qquad L = \frac{FSI}{GSI} \qquad OSR = \frac{(1 - GSI)}{FSI}$$

Avec F la surface plancher totale des bâtiments (en m^2), A l'aire de l'échantillon urbain étudié (m^2), et B la somme des emprises au sol des bâtiments (m^2).

Les auteurs font l'hypothèse qu'une définition de la densité basée sur ces quatre paramètres (FSI, GSI, OSR, L) permet de différencier efficacement les formes urbaines. Ils proposent un diagramme, appelé Spacemate (Figure 15). Ce diagramme propose des iso-courbes de OSR et L dans un plan (FSI ; GSI). Les auteurs ont ensuite cartographié 150 échantillons urbains sur ce diagramme, et ont clairement fait apparaître des clusters correspondant à des types précis de développement urbain (Figure 15), validant de ce fait l'existence d'un lien fort entre la densité ainsi définie et la forme urbaine. Les auteurs suggèrent qu'au-delà de l'utilité de leur approche pour la description spatiale du bâti à l'échelle urbaine, leur recherche ouvre la voie à des travaux sur la performance de la forme urbaine en lien avec la densité. Ils suggèrent par exemple comme pistes de recherche, l'étude du lien entre densité (position dans Spacemate) et des propriétés de la forme urbaines telles que la mixité programmatique, l'accès à la lumière naturelle, ou encore les consommations d'énergie.

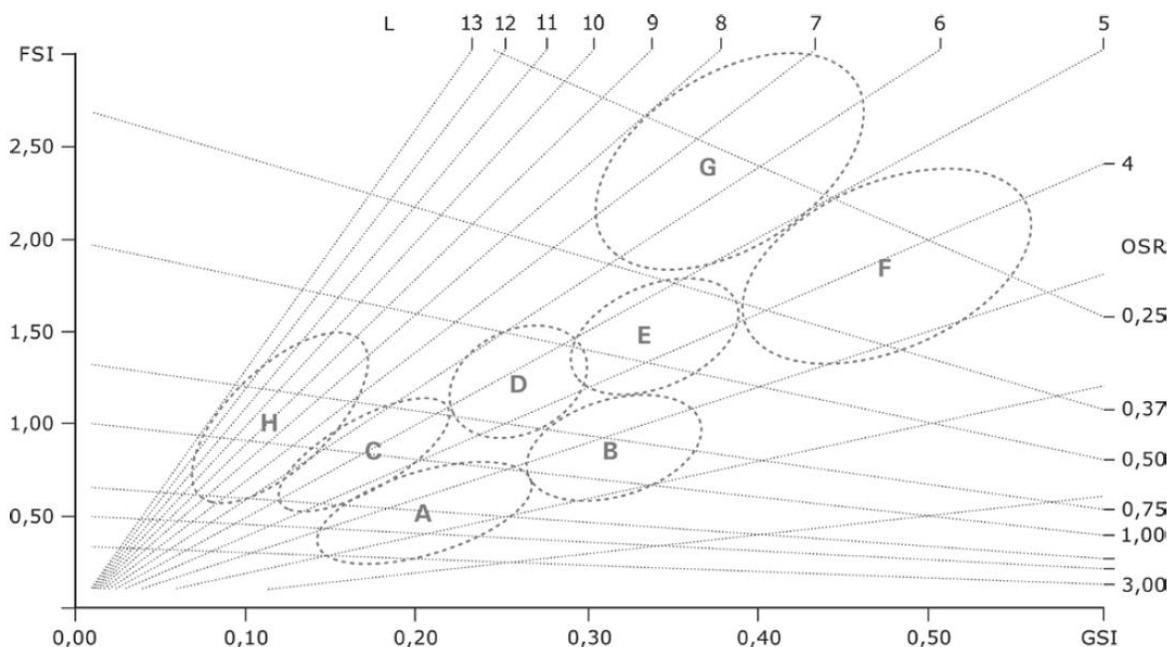


Figure 6. Land development typologies:

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

Figure 15 – Diagramme Spacemate, représentation multivariable de la densité urbaine (Berghauser Pont & Haupt 2005)

Au-delà des descripteurs généraux de la forme urbaine, nous tâchons dans cette section de présenter des exemples d'indicateurs pour l'évaluation des formes urbaines, en nous concentrant sur ceux qui renseignent sur la thématique des interactions entre forme urbaine, climat et énergie en lien avec le climat urbain et le bioclimatisme des bâtiments. Cet état de l'art nous permet de passer en revue les différents types d'indicateurs existants et de statuer s'il en existe ou non des éléments de validation.

3.4.2.1. Indicateurs morphologiques et climat urbain

Le concept de rue canyon et le rapport d'aspect

La ville est très souvent étudiée au travers du concept de rue canyon puisqu'il s'agit d'un élément clé du tissu urbain. Ce concept consiste à définir la rue comme une unité géométrique de longueur infinie et caractérisée par trois paramètres, son orientation, sa largeur (L), la hauteur des bâtiments (H). Ces paramètres géométriques ont une influence directe sur les paramètres microclimatiques au sein de la rue. Ils déterminent bien sûr les flux CLO directs et diffus, mais également les conditions de vent.

Ali-Toudert & Mayer (2006) proposent une analyse en climat chaud et aride de l'effet de l'orientation et du rapport d'aspect des rues canyons (H/L) sur la température de l'air dans la rue canyon. Les résultats en matière de confort thermique sont très contrastés selon la profondeur des rues et les orientations étudiées. Ils mettent en évidence que la période du jour où survient le stress thermique maximal, ainsi que la répartition spatiale des conditions de confort au niveau de la rue, dépendent fortement du rapport d'aspect et de l'orientation. Les études sur les rues canyons ont également mis en évidence différents types d'écoulement selon les configurations géométriques caractérisées par le rapport d'aspect (Vinet 2000). La vitesse des écoulements notamment est affaiblie par un rapport H/L élevé. Dans cette configuration, le piégeage infrarouge en relation avec la mauvaise ventilation de la rue accentue l'effet d'ICU et l'inconfort thermique des piétons (Johansson 2006).

Le facteur de vue du ciel

Un grand nombre d'études sur le microclimat urbain a été réalisé en utilisant comme indicateur morphologique le facteur de vue du ciel (FVC ou *Sky View Factor - SVF* en anglais). Il s'agit d'une mesure de l'angle solide sous lequel le ciel est vu depuis un point de l'espace urbain. C'est un paramètre sans dimension compris entre 0 et 1 qui varie en fonction de la géométrie des structures urbaines. Le FVC conditionne notamment le flux solaire diffus et les échanges GLO de la scène urbaine avec le ciel. Dans le cas d'une rue canyon, le FVC au centre de la rue et le rapport d'aspect sont directement liés (eq. 13). A l'échelle d'un îlot urbain, Bernabé et al. (2015) ont montré par un développement analytique que le FVC moyen dépend linéairement de la densité de façade (D_F) définie comme le ratio de la somme des surfaces de façades sur la somme des surfaces des rues et des enveloppes de bâtiments (eq. 14).

$$FVC = \cos\left(\arctan\frac{2}{H/L}\right) \quad \text{eq. 13}$$

$$FVC = 1 - D_F \quad \text{eq. 14}$$

Au-dessous du niveau des toits, la diminution du FVC réduit les pertes radiatives et, dans le cas de faibles gradients de vent, réduit également les transferts de chaleur turbulents dans l'air de la rue. Par conséquent le FVC est considéré comme l'un des principaux facteurs du phénomène d'ICU (Unger 2009). Une équation formulée par Oke (1981) (eq. 15) établit une relation directe entre la différence maximale de température entre l'espace rural et l'espace urbain (ICU) et le facteur de vue du ciel depuis le milieu des rues.

$$\Delta T_{\max \text{urban-rural}} = 15.27 - 13.88 * FVC \quad \text{eq. 15}$$

Via l'évaluation du FVC pour 35 échantillons urbains de la ville de Szeged (Hongrie) et à des campagnes de mesures des températures d'air au sein de ces mêmes échantillons urbains, Unger (2009) propose pour la ville de Szeged le même type de relation explicitant la corrélation négative entre ICU et FVC (eq. 16).

$$\Delta T_{\max \text{urban-rural}} = 5.499 - 4.059 * FVC \quad \text{eq. 16}$$

L'albédo effectif

L'albédo effectif correspond à la réflectivité solaire d'une surface terrestre hétérogène ou non plane (Bouyer 2009). L'albédo effectif d'une zone urbaine dépend des albédos des matériaux de surface, mais également de la morphologie urbaine.

Du fait de la complexité des modélisations thermo-radiatives à l'échelle du quartier, l'influence de l'albédo effectif sur l'ICU a surtout été étudiée à travers des approches simplifiées mettant l'accent sur l'influence des caractéristiques réfléchives des matériaux urbains sur la température de l'air. Récemment Bernabé et al. (2015) se sont intéressés spécifiquement à l'influence de la morphologie urbaine sur l'albédo effectif. Les auteurs ont étudié les interactions entre les propriétés radiatives urbaines et la morphologie à travers un développement analytique. Un modèle simplifié de bilan énergétique solaire basé sur des indicateurs morphologiques a été développé pour évaluer l'effet de piégeage solaire et pour prédire l'équilibre radiatif à l'échelle du quartier. Ce modèle permet d'établir une relation entre l'albédo effectif, l'albédo des surfaces, la densité de façade et la densité bâtie (eq. 17).

$$A = \frac{\rho(1 - D_B)^2(1 - D_F)}{(1 - D_F) + D_F(1 - \rho)} + D_B \quad \text{eq. 17}$$

Où A est l'albédo effectif, ρ est l'albédo des différentes surfaces urbaines (considéré homogène dans ce développement), D_F est la densité de façade et D_B est la densité bâtie (CES).

Les albédos effectifs de 440 blocs urbains réels ont été évalués sur la base de ce modèle simplifié et par des simulations thermo-radiatives avec le logiciel SOLENE. Les comparaisons entre les résultats du modèle simplifié et les simulations montrent un très bon accord permettant aux auteurs de conclure que l'effet de piégeage solaire en milieu urbain peut être évalué à partir d'indicateurs morphologiques.

Systèmes intégrés d'indicateurs morphologiques

Dans l'objectif de caractériser les relations entre forme urbaine, climat et énergie, certains auteurs ont proposé des systèmes de descripteurs de la forme urbaine dans le but de couvrir plusieurs thématiques, et qui reprennent pour partie les indicateurs listés précédemment. Afin d'illustrer cette approche, nous en proposons deux exemple ci-dessous.

Ainsi Adolphe (2009) propose un systèmes d'indicateurs morphologiques de la ville durable. Ce système d'indicateurs à l'échelle du quartier est conçu comme un outil d'aide à la décision pour les développeurs de projets urbains, et fait l'objet d'une implémentation dans une plateforme SIG baptisée « Morphologic ». L'auteur part du même constat, évoqué précédemment, qu'il est trop limitant d'aborder la thématique de l'empreinte écologique urbaine par le seul biais des indicateurs de densité. Il postule qu'une approche plus riche, basée sur la compacité, la continuité des tissus urbains, la connectivité du réseau viaire, la densité d'intersections, le nombre de chemins, la multi-centralité ou encore la mixité urbaine est nécessaire. Par ailleurs, l'auteur distingue trois échelles d'analyse pour les relations entre forme urbaine, climat et énergie (qui sont bien sûr en interaction) ; la micro-échelle (un espace public, une rue), la méso-échelle (un quartier), la macro-échelle (la ville). La micro-échelle relève du domaine de la simulation numérique, la macro-échelle est quant à elle souvent limitée à l'étude de la rugosité urbaine (pour caractériser l'influence du tissu urbain sur le vent incident) et de l'effet d'ICU. L'échelle du quartier

apparaît donc comme l'échelle pertinente pour l'analyse des interactions entre forme urbaine, climat et énergie.

L'auteur assimile à cette échelle le tissu urbain à un milieu poreux rigide et propose un jeu d'indicateurs de performance environnementale originaux, dérivés de cette analogie ; rugosité, porosité, sinuosité, occlusivité, compacité, admittance solaire et minéralisation (Figure 16).

$$\begin{aligned}
 R_\alpha &= \frac{\sqrt{\sum_i (h_i - h_\alpha)^2 * l_i^2}}{\sum_i * l_i} \quad [m] \\
 P_o &= \frac{\sum_{open\ spaces} \pi * r_{hi}^2 * L_i}{\sum_{open\ spaces} V_i + \sum_{built} V_j} \quad [V] \\
 S_\theta &= \frac{\sum_{segm.\ rues} L_i * \cos^2(\theta_i)}{\sum_{segm.\ rues} L_i} \quad [V] \\
 O_c &= \frac{1}{N_{HorizCuts}} * \sum_{N_{HorizCuts}} \frac{P_{built}}{P_{unbuilt}} \quad [V] \\
 C_f &= \sum_{buildings} \frac{A_{ext}}{V^{2/3}} \quad [V] \\
 C_i &= \frac{\sum_{buildings} \frac{A_{adj} * A_{floor}}{A_{vert}}}{\sum_{buildings} A_{floor}} \quad [V] \\
 A_s &= \frac{\sum A_i * C_{contiguity} * C_{orientation} * C_{shading}}{\sum_{ExtWalls} A_i} \\
 M &= \frac{A_T - \sum_i A_u}{A_T} \quad [V]
 \end{aligned}$$

Figure 16 - Indicateurs morphologiques caractéristiques de la performance énergétique et du microclimat urbain (Adolphe 2009)

S'agissant du vent, cette assimilation du tissu urbain à un milieu poreux permet de différencier les conditions climatiques au-dessus des toits et en-dessous des toits. Au-dessus des toits, on considère que les conditions dépendent des conditions climatiques régionales et de paramètres locaux comme la topographie du site et la hauteur des bâtiments. Ceci conduit à la réduction de la vitesse moyenne quadratique du vent qui peut être évaluée à l'aide d'un premier indicateur, la rugosité. S'agissant de la canopée urbaine, l'analogie avec un milieu poreux permet de faire la distinction entre les espaces ouverts (les pores c'est-à-dire les rues), et les espaces fermés (les cours). Le gradient de pression dans les espaces ouverts peut alors être approché par la surface frontale d'une rue et son orientation par rapport à la direction du vent incident. Quant à l'air des espaces fermés, on néglige son influence sur le gradient de pression général. Ces deux aspects sont représentés par les indicateurs de porosité et de sinuosité.

S'agissant de la température de l'air, l'approche se limite aux bâtiments et aux surfaces d'eau et surfaces végétales. L'effet des surfaces végétales et surfaces d'eau est représenté par un taux de minéralisation. Pour ce qui est des bâtiments, l'hypothèse est faite d'une technologie de construction homogène, proportionnelle à la surface d'enveloppe des bâtiments. Deux paramètres sont définis, la compacité et la continuité. Il est intéressant de noter que la compacité définie ici (Figure 16) a été adimensionnée par un facteur de taille (en considérant le volume des bâtiments élevé à la puissance 2/3).

En ce qui concerne l'ensoleillement, l'auteur fait l'hypothèse que le facteur de vue du ciel est un facteur critique que ce soit pour évaluer le flux CLO incident, absorbé et réfléchi. Le FVC est approché ici par un paramètre simple, l'occlusivité, basé sur la distribution des périmètres des bâtiments en fonction de l'altitude. Enfin, pour évaluer la capacité du tissu urbain à capter le flux CLO incident, un indicateur

simplifié d'admittance solaire est proposé, calculé de manière empirique à partir de coefficients traduisant l'effet de l'orientation des façades, de la continuité du tissu urbain et des masques solaires lointains, ainsi qu'à partir de l'albédo moyen du tissu urbain. L'auteur précise que ces deux derniers paramètres peuvent également être évalués empiriquement à partir de la densité bâtie.

Afin de construire une classification climatique visant à améliorer les procédures d'installation d'équipements de mesure météorologique en milieu urbain Oke (2004) a construit la classification *Urban Climate Zone* (UCZ) qui différencie les formes urbaines par rapport à la façon dont elles modifient l'écoulement du vent ainsi que les variables thermiques et hydriques. Les UCZ se définissent notamment à partir de plusieurs indicateurs urbains relatifs à la morphologie urbaine et à l'occupation du sol. La classification *Local Climate Zone* (LCZ), proposée par Stewart (2011) s'inscrit dans la suite des travaux de Oke et poursuit cette démarche qui vise à construire une typologie climatique urbaine à l'échelle du quartier. Elle se fixe notamment les objectifs suivants : prendre en compte un nombre significatif de paramètres urbains, considérer de façon équilibrée les zones urbaines et les zones rurales, adopter une nomenclature claire et non équivoque, et pouvoir être utilisée dans une grande majorité des agglomérations du monde. Le travail de Stewart a abouti à une typologie constituée de 17 types de LCZ (Figure 17) définies comme des zones présentant des traits spécifiques du point de vue de la morphologie urbaine, de l'occupation du sol, des matériaux urbains et du métabolisme urbain, et dont le diamètre est supérieur ou égale à 400m. Les caractéristiques de chaque zone modifient le microclimat de celle-ci et favorisent l'émergence d'un régime particulier de température d'air au sein de la couche limite de la canopée urbaine, particulièrement dans des conditions météorologiques de vent faible et de nébulosité faible.

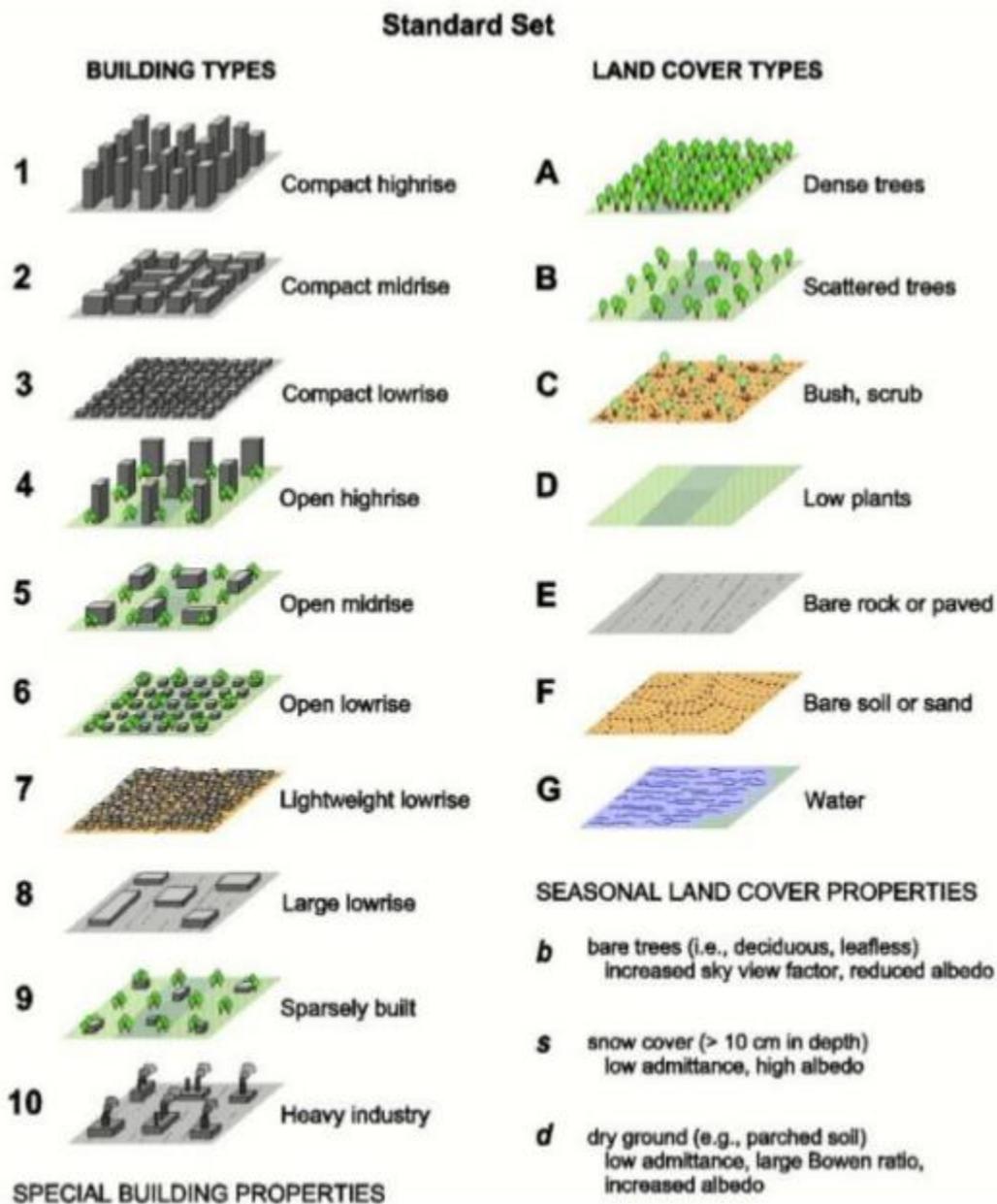


Figure 17 – Les 17 types de LCZ (10 types urbanisés et 7 types non-urbanisés) (Stewart 2011)

Chaque LCZ est définie par 10 paramètres (Figure 18) parmi lesquels on trouve une majorité d'indicateurs morphologiques : facteur de vue du ciel, rapport d'aspect, hauteur moyenne des bâtiments, classe de rugosité, coefficient d'emprise au sol, fraction de surface imperméable, ratio de surface perméable, ou encore albédo effectif.

LCZ KEY	ZONE NAME	#
ZONE DEFINITION		
<p>Form: Description of building morphology, land cover, construction materials, tree geometry, and human activity. Function: Land uses most likely associated with this zone. Location: Expected location of the zone (core, periphery; city, countryside). Correspondence: Comparable zones in the urban classification systems of Oke (2004) and Ellefsen (1990/91).</p>		
ZONE ILLUSTRATION		
<p>Land cover</p> 	<p>High-angle photographs (© Can Stock Photo Inc.)</p> 	
<p>Objects</p> 	<p>Low-level photographs (© Can Stock Photo Inc.)</p> 	
ZONE PROPERTIES		
<p>Sky view factor ψ_{sky} 0 – 1</p>	<p>Fraction of sky hemisphere visible from ground level. Varies with height and spacing of buildings and trees. Affects surface radiational heating/cooling.</p>	
<p>Aspect ratio H/W 0 – 3*</p>	<p>Mean height-to-width ratio of street canyons (LCZ 1–7), building spacing (LCZ 8–10), and tree spacing (LCZ A–F). Affects surface airflow and radiational heating/cooling.</p>	
<p>Mean building/tree height z_{31} 0 – 50* m</p>	<p>Geometric average of building heights (LCZ 1–10) and tree/plant heights (LCZ A–F). Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground.</p>	
<p>Terrain roughness class 1 – 8</p>	<p>Davenport et al. (2000) classification of effective terrain roughness (z_0) for city and country landscapes: 1–“sea” ($z_0 \sim 0.0002$ m); 2–“smooth” ($z_0 \sim 0.005$ m); 3–“open” ($z_0 \sim 0.03$ m); 4–“roughly open” ($z_0 \sim 0.10$ m); 5–“rough” ($z_0 \sim 0.25$ m); 6–“very rough” ($z_0 \sim 0.5$ m); 7–“skimming” ($z_0 \sim 1.0$ m); 8–“chaotic” ($z_0 \sim 2$ m). Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground.</p>	
<p>Building surface fraction λ_b 0 – 100 %</p>	<p>Proportion of ground surface with building cover. Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground.</p>	
<p>Impervious surface fraction λ_i 0 – 100 %</p>	<p>Proportion of ground surface with impervious cover (paved, rock). Affects surface reflectivity, moisture availability, and heating/cooling potential.</p>	
<p>Pervious surface fraction λ_p 0 – 100 %</p>	<p>Proportion of ground surface with pervious cover (bare soil, vegetation, water). Affects surface reflectivity, moisture availability, and heating/cooling potential.</p>	
<p>Surface admittance μ 0 – 3,000* J m⁻² s⁻¹ K⁻¹</p>	<p>Ability of surface to accept or release heat. Affects surface heat storage and heating/cooling rates. Values give typical range for surfaces in each LCZ (e.g., buildings, roads, soils, water). Varies with soil wetness and material density.</p>	
<p>Albedo α 0 – 0.5</p>	<p>Surface reflectivity at local scale, under a clear midday sky. Affects surface radiational heating potential. Varies with surface wetness.</p>	
<p>Anthropogenic heat flux Q_F 0 – 400* W m⁻²</p>	<p>Mean annual anthropogenic heat flux density at local scale. Heat sources include vehicle engines, industrial/domestic combustion processes, space cooling/heating, and human metabolism. Varies significantly with latitude, season, and population density.</p>	

Figure 18 - Structure d'un type de LCZ (Stewart 2011)

Chaque LCZ possède un comportement climatique unique. Ainsi le concept de LCZ met en évidence la relation de causalité existant entre les caractéristiques urbaines d'une part, et comportement thermique d'autre part. La classification LCZ offre la possibilité d'exprimer les écarts de température entre différentes zones, et permet de s'abstraire des références « urbaine » et « rurale » qui sont mal définies. Elle propose ainsi une expression plus claire de l'amplitude de l'ICU.

Lecointe et al. (2015) ont testé la classification LCZ sur la ville de Nancy. Les auteurs ont établi une carte des LCZ pour la ville, et réalisé une campagne extensive de mesures mobiles de la température de l'air à

2m au-dessus du sol. Ces résultats de mesure à haute résolution spatiale ont permis d'étudier les différences de température inter-LCZ mais également les distributions de température intra-LCZ. Ces résultats montrent que la nuit, les différences de température intra-LCZ sont généralement limitées, de l'ordre de 0,5°C – 2°C pour les LCZ urbanisées. Ces hétérogénéités à la micro-échelle sont clairement mises en relation avec des LCZ qui présentent des tissus urbains hétérogènes. Enfin, à la méso-échelle les auteurs ont pu démontrer l'opérationnalité de la classification LCZ au travers des différences de températures moyennes entre les types ; Les différences de températures sont toujours inférieures à 1°C pour les LCZ similaires, alors qu'elles peuvent atteindre 4,4°C pour des LCZ différentes.

3.4.2.2. Indicateurs morphologiques et bioclimatisme des bâtiments

De nombreux travaux se penchent également sur la définition d'indicateurs morphologiques relatifs au bioclimatisme des bâtiments.

Nault et al. (2015) proposent une analyse critique des indicateurs classiquement utilisés pour l'évaluation des potentiels solaires des bâtiments à l'échelle du quartier. Cette étude propose à partir d'un recensement d'indicateurs, de tester si ceux-ci sont des indicateurs de performance valables à l'échelle d'un quartier. Pour ce faire, les indicateurs recensés sont classés par degré de complexité ainsi que par thématique, puis certains de ces indicateurs sont comparés à des résultats de simulation.

Les auteurs ont recensé les indicateurs relatifs à l'évaluation du potentiel solaire d'une forme urbaine et en proposent une catégorisation. Le premier axe de catégorisation concerne les critères de performance adressés par les indicateurs. Les auteurs distinguent ainsi cinq types de critères de performance ;

- *Passive*, c'est-à-dire relatif au potentiel de chauffage passif lié aux apports solaires,
- *Daylight*, relatif au potentiel d'éclairage naturel,
- *Active*, relatif au potentiel de production d'énergies renouvelables solaires,
- *Energy*, relatif aux besoins de chaud et de froid des bâtiments,
- *Other*, pour les autres critères de performance tels que le confort dans les espaces extérieurs.

Le second axe de catégorisation concerne la nature des indicateurs. Les auteurs proposent de distinguer les indicateurs selon leur degré de complexité ;

- les indicateurs de type *Geometry-based* qui sont des indicateurs morphologiques dont le calcul est basé sur les seules données géométriques du quartier. Ce sont les indicateurs les plus simples à obtenir, puisqu'ils ne reposent pas sur de la simulation. Par contre, ils sont indépendants du climat et des niveaux d'irradiation solaire. Par la suite nous appelons ces indicateurs « indicateurs morphologiques ».
- les indicateurs de type *External solar - and geometry-based* qui sont des indicateurs morpho-climatiques calculés à partir des niveaux d'irradiation solaire. Ils nécessitent l'évaluation des niveaux d'irradiation des différents types de surfaces urbaines. Par la suite nous appelons ces indicateurs « indicateurs de potentiel solaire des enveloppes ».
- les indicateurs de type *Full climate - and geometry based* qui ne sont ni des indicateurs morphologiques ni des indicateurs morpho-climatiques, mais des résultats de simulations (thermique du bâtiment ou éclairage naturel) obtenus sur la base de modélisations simplifiées des

bâtiments compatibles avec les phases amonts de conception d'un projet d'aménagement. Par la suite nous appelons ces indicateurs « indicateurs de performance des bâtiments ».

Parmi les indicateurs morphologiques, on trouve par exemple la densité, la compacité, la zone passive, le facteur de vue du ciel, le rapport d'aspect des rues ou encore le pourcentage de façade selon les différentes orientations.

La compacité est un indicateur très souvent utilisé en lien avec la thématique des besoins de chauffage des bâtiments. Plusieurs mesures de compacité sont souvent utilisées lors de l'analyse des besoins thermiques des bâtiments. La compacité volumique (C_V) est calculée comme le rapport entre la surface de l'enveloppe du bâtiment et son volume (eq. 18). C_V peut également être analysée comme le produit d'un facteur de forme adimensionnelle (F_F) (eq. 19) et un d'un facteur de taille (F_T) (eq. 20), ce qui permet de distinguer les bâtiments de même forme et donc de même compacité, mais de tailles différentes. En architecture, il arrive également que la compacité soit définie en fonction de la surface plancher, on parle alors de compacité surfacique (C_S), qui est calculée comme le rapport entre la surface de l'enveloppe et la surface plancher (eq. 21).

$$C_V = S/V \quad \text{eq. 18}$$

$$F_F = S/V^{2/3} \quad \text{eq. 19}$$

$$F_T = 1/V^{1/3} \quad \text{eq. 20}$$

$$C_S = S/S_P \quad \text{eq. 21}$$

Où S est la surface de l'enveloppe, V est le volume du bâtiment, et S_P est la surface plancher.

La zone passive est définie comme le volume ou la surface plancher situé à moins de 6m de l'enveloppe, ce qui permet théoriquement l'éclairage et la ventilation naturels de ces espaces. C'est un paramètre essentiel pour caractériser le potentiel d'utilisation de systèmes passifs (éclairage et ventilation naturels, apports solaires passifs).

Malgré l'usage fréquent des indicateurs de compacité pour aborder la question des besoins thermiques des bâtiments, leur validité est souvent questionnée. Ainsi Salat (2011) attire l'attention sur le fait que la compacité ne doit jamais être le seul paramètre considéré. En effet, des travaux des années 70 en cherchant à adresser la question de la réduction des pertes de chaleur ont débouché, dans le contexte des pays du nord et d'enveloppes de bâtiments mal isolées, à mettre très fortement l'accent sur la compacité. Hors, les performances thermiques des enveloppes ont été multipliées par 4 ces 20 dernières années, ce qui rend quatre fois moins important l'impact de la compacité volumétrique. Avec les meilleurs standards d'isolation, et des apports internes supérieurs, les facteurs les plus importants dans la consommation énergétique se sont aujourd'hui déplacés vers l'éclairage et la ventilation mécanique, pour lesquels les effets de la géométrie urbaine sont inversés. Pour maximiser l'éclairage naturel, il convient de maximiser la zone passive et donc de diminuer la compacité. En réalité, la difficulté avec les indicateurs de compacité est qu'à l'échelle urbaine, ils subissent une perte d'information importante, par rapport à l'échelle du bâtiment. En effet, une compacité calculée sur une texture urbaine, ne permet pas de différencier une somme de petits bâtiments compacts, qui peuvent également présenter des pourcentages élevés de volumes passifs, ou de grands bâtiments compacts. Elle ne permet pas d'appréhender le grain de la texture.

Les indicateurs de potentiel solaire des enveloppes sont majoritairement basés sur des niveaux d'irradiation, évalués sur des surfaces spécifiques (façades par orientation, toits), et sur des périodes de temps variables (solstice, saison). Certains indicateurs peuvent inclure des seuils, comme par exemple le pourcentage de surface d'enveloppe recevant une énergie cumulée en période estivale supérieure à un seuil prédéfini. Cet indicateur est utilisé par (Andersen & Nault 2013) comme indicateur du risque de surchauffe estivale des bâtiments.

Enfin, les indicateurs de performance des bâtiments sont par exemple les besoins annuels de chauffage ou de refroidissement par m² de plancher, ou l'autonomie spatiale d'éclairage naturel (*spatial daylight autonomy*) c'est-à-dire le pourcentage de surface à hauteur de plan de travail qui reçoit au moins 30 lux sur plus de 50% des heures d'occupation. L'évaluation de ces indicateurs en phase amont de conception et à l'échelle du quartier nécessite de nombreuses hypothèses et simplifications.

L'état de l'art proposé par Nault et al. (2015) met en évidence la variété des indicateurs existants et le fait que la plupart des études proposent des méthodes spécifiques à un ou quelques cas d'études et que leurs résultats ne sont pas directement réutilisables pour d'autres cas d'étude. L'accent est également mis sur le manque de validation de ces indicateurs simples proposés dans la littérature en tant qu'indicateurs d'évaluations pertinents pour tel ou tel critère de performance. Afin d'y remédier, les auteurs testent la capacité d'un certain nombre d'indicateurs morphologiques et de potentiel solaire des enveloppes, à refléter une sélection d'indicateurs de performance des bâtiments qui sont considérés comme les indicateurs de référence. Les indicateurs sélectionnés pour cette analyse sont présentés Figure 19.

Metrics compared for each performance criterion. PV and ST: photovoltaic panels and solar thermal collectors installed on facades (-F) or roofs (-R).

Performance criteria		1. Geometry-based metrics	2. External solar- and geometry-based metrics	3. Full climate- and geometry-based metrics (reference)
Passive solar	Heat gains	Density Compactness Passive zone Glazing ratio	Envelope area with irradiation > I _{heat gains} (%)	Annual heating need per floor area (kWh/m ²)
	Heat avoidance		Envelope area with irradiation < I _{heat avoidance} (%)	Annual cooling need per floor area (kWh/m ²)
	Daylight		Facade area with illumination > I _{daylight} (%)	Spatial daylight autonomy (%)
Active solar	PV-F		Facade area with irradiation > I _{PV-F} (%)	Annual estimated energy production on roof/façade per floor area (kWh/m ²)
	ST-F		Facade area with irradiation > I _{ST-F} (%)	
	PV-R		Roof area with irradiation > I _{PV-R} (%)	
	ST-R		Roof area with irradiation > I _{ST-R} (%)	

Figure 19 – Indicateurs sélectionnés par Nault et al. (2015) dans le cadre de l'analyse des indicateurs de potentiel solaire des bâtiments à l'échelle du quartier

Les indicateurs morphologiques sélectionnés sont : des indicateurs de densité (CES et COS), la compacité, la zone passive, et enfin le ratio de vitrage (ratio de la surface de vitrage sur la surface plancher).

Les indicateurs de potentiel solaire des enveloppes sélectionnés sont des indicateurs basés sur l'utilisation d'une valeur seuil d'irradiation solaire ou d'éclairement lumineux. Ces indicateurs s'expriment en pourcentage de surface de façade ou de toit dont l'irradiation solaire ou l'éclairement lumineux dépasse des valeurs seuil. En plus de ces indicateurs, l'irradiation solaire annuelle est calculée pour les toits, pour les façades, et pour les deux combinés. Ces valeurs sont également normalisées par la surface totale d'enveloppe et par la surface plancher.

Les auteurs ont testé la robustesse de ces indicateurs en tant qu'indicateurs de performance relatifs aux thématiques suivantes; besoin de chaud et de froid, éclairage naturel et production d'EnR solaire. Ce test consiste en la recherche de corrélations avec des indicateurs de référence pour les différentes

thématiques. Ces indicateurs de référence sont des indicateurs de performance des bâtiments : i. les besoins annuels de chauffage, ii. Les besoins annuels de froid, iii. une estimation de la production annuelle d'énergie par des panneaux PV et des collecteurs solaires, et iv. l'autonomie spatiale d'éclairage naturel. Cette recherche de corrélations est effectuée sur deux jeux de modèles; i. six projets d'aménagement pour un même quartier, et ii. une étude paramétrique qui a permis de générer un grand nombre de variante (798) pour un même quartier.

Les résultats principaux concernant les indicateurs morphologiques sont les suivants :

- Les indicateurs qui représentent le mieux les besoins de chaud et de froid sont les indicateurs de compacité et de pourcentage de surface vitrée. Cependant les auteurs ont mis en évidence une difficulté à l'utilisation de ces indicateurs. Ils ont montré que dans un cas de comparaison de formes urbaines très différentes, des valeurs faibles de ces deux indicateurs sont à rechercher, alors que dans un cas de comparaisons de variantes établies à partir d'une unique forme urbaine, les formes les plus performantes sont celles présentant un pourcentage de vitrage élevé, parmi les formes présentant une faible compacité.
- S'agissant du potentiel d'éclairage naturel, c'est l'indicateur de zone passive qui présente la meilleure corrélation avec l'autonomie spatiale d'éclairage naturel.

Les résultats principaux concernant les indicateurs de potentiel solaire des enveloppes :

- Trois indicateurs sont comparés ; le pourcentage de surface exposées recevant une irradiation supérieure à un seuil, le taux d'irradiation annuel par m² d'enveloppe et le taux d'irradiation annuel par m² de plancher. Parmi ces trois indicateurs, le taux d'irradiation annuel par m² de plancher est l'indicateur le mieux corrélé à l'ensemble des critères de performance.
- Cependant, les auteurs présentent un résultat contre-intuitif, dans le cas des besoins de chauffage, cet indicateur doit être minimisé et non pas maximisé, ceci étant dû dans le contexte de l'étude à une prédominance des pertes thermiques pour des enveloppes peu compactes.
- Pour les autres critères de performance, éclairage naturel et systèmes actifs, cet indicateur doit être maximisé. Ce qui induit un usage difficile de cet indicateur pour « optimiser » simplement un projet.

Ces travaux mettent en évidence la difficulté à rendre compte des potentiels bioclimatiques des bâtiments à partir d'indicateurs liés à la forme urbaine, qu'ils soient géométriques ou qu'ils intègrent l'évaluation de niveaux d'irradiation solaire ou d'éclairement lumineux. Quand des corrélations existent entre ces indicateurs et les indicateurs de référence pour les critères de performance étudiés, l'utilisation de ces indicateurs reste complexe ;

- les corrélations ont parfois des tendances contre-intuitives,
- elles peuvent également avoir des tendances opposées selon les critères de performance,
- pour certains critères de performance (ex : les besoins en climatisation) les auteurs n'ont pas pu dégager de corrélations nettes,
- les corrélations qui ont pu être établies pour un climat ne sont plus valable dans un autre climat,
- ou encore ces corrélations peuvent s'affaiblir dans le cas de formes urbaines plus denses ou de bâtiments plus hauts.

Les auteurs proposent des pistes de recherche afin de surmonter ces difficultés, notamment le développement d'indicateurs tenant compte des orientations des différentes façades, et l'intégration des deux types d'indicateurs, géométriques et de potentiel solaire des enveloppes.

Sur la thématique du vent, Wang (2015) s'intéresse aux impacts de la morphologie urbaine sur la performance énergétique éolienne au niveau des toits et à l'échelle du quartier. Dans ces travaux l'auteur travaille également avec deux types d'indicateurs ; des indicateurs du potentiel éolien qui sont utilisés comme indicateurs de performance, et des indicateurs morphologiques ayant une influence sur le vent. Des résultats obtenus pour ces deux classes d'indicateurs sur six formes urbaines réelles sont alors croisés pour déterminer des indicateurs morphologiques capables d'approcher les indicateurs de potentiel éolien. Cette étude met notamment en évidence la capacité de deux indicateurs morphologiques à représenter le potentiel éolien à l'échelle du quartier évalué par CFD : le coefficient de variation de hauteur des bâtiments (défini comme le rapport de l'écart type des hauteurs sur la moyenne des hauteurs) ; et la rugosité relative (définie comme l'écart type des volumes des bâtiments). Les enseignements tirés de ces analyses ainsi que d'analyses complémentaires sur des variations de formes urbaines génériques permettent à l'auteur de proposer un nouvel indicateur morphologique du potentiel éolien pour un bâtiment au sein d'un quartier, l'impact d'obstacle des bâtiments, ainsi qu'une méthode mathématique simplifiée basée sur cet indicateur pour l'évaluation de la vitesse au-dessus du toit d'un bâtiment en fonction de la vitesse et de la direction du vent incident et de l'environnement urbain.

3.4.3. Etudes des formes urbaines

Les recherches sur le lien entre forme urbaine et performance environnementale (microclimat urbain ou bioclimatisme des bâtiments) peuvent avoir un point de départ théorique, mais elles passent souvent par l'étude détaillée de formes urbaines à partir de laquelle sont recherchés des principes généraux ou des lois empiriques. On rencontre alors deux types d'études, celles portant sur des formes urbaines archétypales et celles portant sur des formes urbaines réelles. Les deux types d'étude présentent des avantages et des inconvénients. Les formes urbaines archétypales, de par leur simplicité, et du fait de la possibilité d'y appliquer des variations paramétriques permettent d'établir plus facilement des principes généraux en matière de performance environnementale. Cependant l'application de ces grands principes à des tissus urbains réels, nécessite de pouvoir associer une forme réelle à un archétype ce qui constitue souvent une étape bloquante. Les études de formes urbaines réelles tentent de prendre en compte toute la complexité des phénomènes à l'œuvre et permettent de dégager des relations ayant une validité locale. L'établissement de lois empiriques à partir de ce type d'études nécessite de multiplier les cas d'étude.

3.4.3.1. Etudes des formes urbaines archétypales

L'étude et la théorisation des formes urbaines, et notamment avec pour point de départ les questions de densité, ont mené à l'élaboration de formes urbaines archétypales (ou génériques) dont les impacts ont ensuite été analysés. Dans la littérature sur le sujet, ces réflexions s'appuient très souvent sur une opposition entre deux types bâtis ; les pavillons (ou blocs) et les cours. Salat (2011) indique sur ce sujet que le changement typologique le plus fondamental entre les villes historiques et les villes modernistes est sans conteste le remplacement du type de groupes de bâtiments formant des îlots à cours, quasi universel jusqu'au début du XX^e siècle, par des bâtiments isolés.

Les travaux qui font référence à ce sujet ont été initiés à la fin des années 1960 par Leslie Martin et ses équipes à l'Université de Cambridge. La première question alors abordée par les chercheurs a été celle de la meilleure utilisation possible du sol. Ce questionnement a notamment permis de mettre en lumière

l'efficacité des formes basées sur des « cours » par rapport aux formes basées sur des pavillons. Pour un même CES, même COS et mêmes hauteurs de bâtiments, les « cours » permettent un espace plus ouvert (Figure 20).

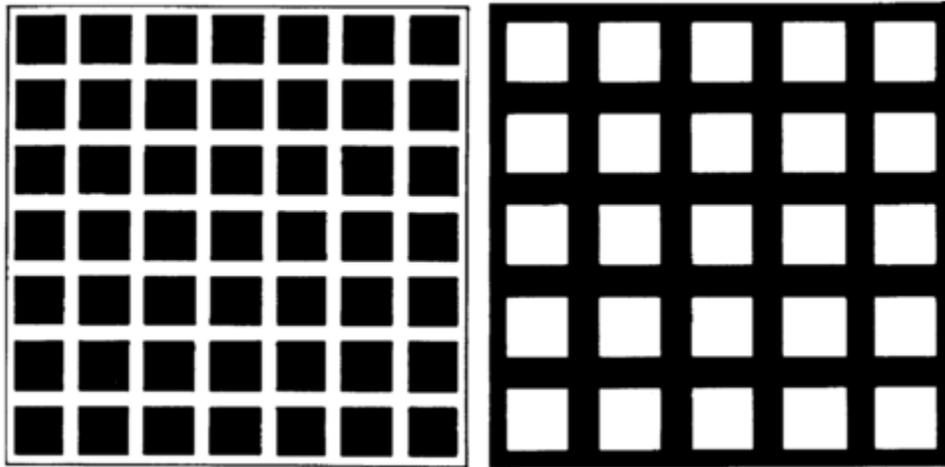


Figure 20 - Deux formes urbaines archétypales extrêmes, basées sur des pavillons (à gauche) et sur des cours (à droite), et présentant les mêmes CES, COS, et hauteurs des bâtiments (Martin & March 1972)

Ces travaux ont également conduit les auteurs à faire une proposition volontairement provocatrice pour le remplacement du centre de Manhattan par de grands immeubles à cours, remplaçant une moyenne de 21 étages par des bâtiments à 7 étages. Cette proposition, tout en conservant la surface plancher construite, permet la création de larges espaces ouverts et une diminution de 2/3 de la hauteur moyenne des bâtiments (Figure 21).

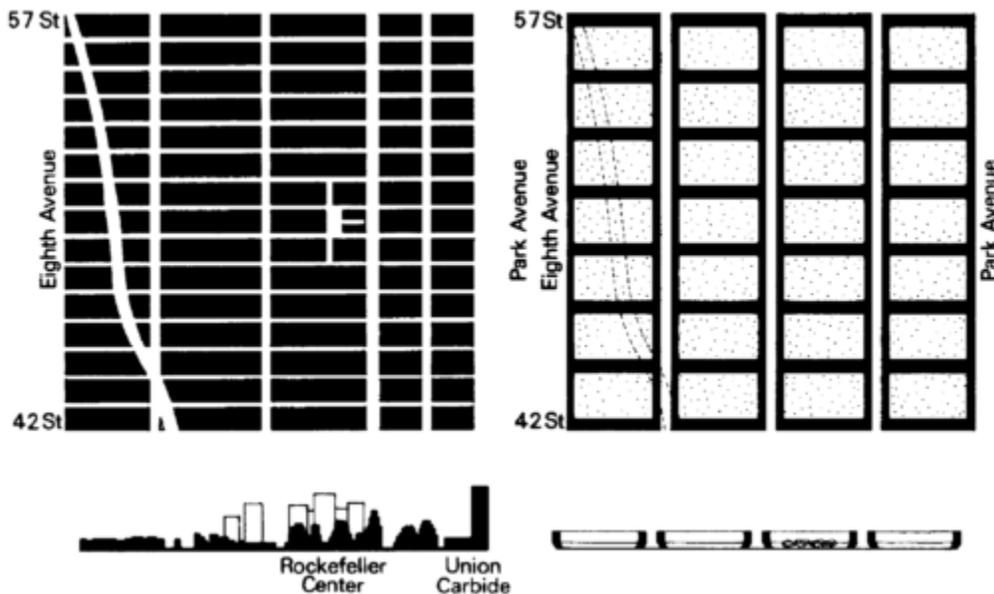


Figure 21 – Proposition radicale pour le remplacement du centre de Manhattan par des bâtiments à large cours (Martin & March 1972).

Martin & March (1972), proposèrent également six formes urbaines archétypales simplifiées dérivés des types blocs et cours (Figure 22) qu'ils étudièrent en fonction de deux critères, la densité bâti et le potentiel d'éclairage naturel, et conclurent que les formes basées sur des cours sont plus performantes selon les deux critères.

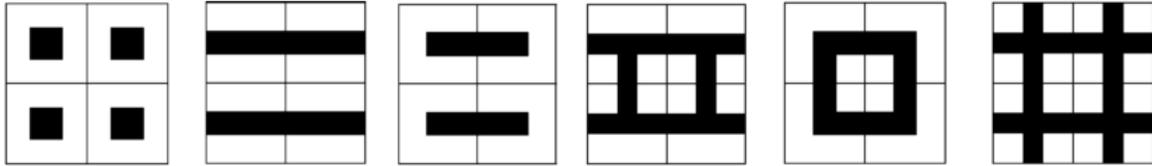


Figure 22 - Formes urbaines archétypales proposés par (Martin & March 1972) . De gauche à droite; blocs (pavillons), barres (slabs), maisons en bande (terraces), maisons en bande à cours (terrace-courts), îlots à cours (pavillon-courts) et tissu continu de maisons à cours (courts).

Cette typologie de formes urbaines archétypales est régulièrement mobilisée dans la littérature. Steemers (1995) propose dans le cadre du projet ZED, une analyse de ces six formes urbaines selon les thématiques suivantes ; irradiation solaire, vent, et énergétique. Les formes étudiées présentent les caractéristiques suivantes : les blocs (11 niveaux), les barres (9 niveaux), les maisons en bande (6 niveaux), les maisons en bande à cours (5 niveaux), les îlots à cours (6 niveaux), et les tissus continus de maisons à cours (4 niveaux). Afin de ne regarder que l'influence de la forme, les hauteurs ont été ajustées de sorte que tous les cas d'étude présentent la même densité bâtie et le même ratio de zone passive. Les études sont réalisées pour le climat de Londres et conduisent aux résultats suivants qui témoignent de l'importance de la forme urbaine sur la performance environnementale des quartiers :

- Irradiation solaire : le tissu à cours continu est la forme qui reçoit le plus de rayonnement sur ses surfaces de bâtiments (21% de plus que les barres orientées Nord-Sud et 17% de plus que les barres orientées Est-Ouest). Les barres sont la forme qui reçoit le moins de rayonnement et qui est la plus affectée par l'orientation. De plus, les barres ne supportent pas l'augmentation de la densité puisque très rapidement de forts problèmes d'ombrage apparaissent.
- Vent : la porosité de la texture urbaine affecte les vents et donc le potentiel de ventilation naturelle ou encore la dispersion des polluants. Les différentes formes urbaines montrent des comportements très différents face à ce processus directionnel dépendant de la direction du vent par rapport à l'axe des rues et des espaces ouverts. Les rues ouvertes continues alignées sur la direction sont mieux ventilées. On note toutefois que des turbulences générées par des objets massifs (tours) orientés à 45° par rapport au vent peuvent perturber ce résultat. Les formes à cours quant à elles, sont moins perturbées par les turbulences et assurent un bon niveau de protection contre les vents d'hiver.
- Analyse énergétique : la forme urbaine la plus efficace en matière de besoins thermiques des bâtiments est la texture à cours et la moins efficace est la barre orientée selon un axe nord-sud (elle présente les plus grandes obstructions à la lumière naturelle, avec des gains solaires utiles limités).

L'auteur a également examiné la performance énergétique de blocs urbains réels à Londres. La grande variabilité des résultats (de 166 kWh/m² à 282 kWh/m²) est expliquée par les caractéristiques urbaines telles que la profondeur en plan (exprimé en termes de zone passive ou de compacité), le niveau d'obstruction et l'orientation. L'étude a montré que les bâtiments avec des plans étroits (faible ratio de

volume par rapport à la surface) ont une efficacité énergétique supérieure aux bâtiments les plus profonds, alimentant encore le débat sur la compacité. Le niveau d'obstruction et les orientations ont une influence de second ordre sur l'utilisation d'énergie finale.

Ratti et al. (2003) proposent une actualisation de l'évaluation environnementale de ces formes urbaines archétypales et abordent la question de la dépendance de la performance au climat à travers un cas d'étude dans une région chaude et aride. Les auteurs se concentrent principalement sur l'exposition solaire. Les premiers résultats concernent les facteurs de vue du ciel qui sont choisis comme mesure du potentiel d'éclairage naturel. Des valeurs de FVC sont évaluées tous les 3m sur les façades et au sol (Figure 23), puis des moyennes de FVC sont calculées sur les façades qui sont supposées représentatives des conditions d'éclairage naturel des bâtiments. S'agissant des formes à cours, les auteurs mettent en évidence que la faible hauteur (efficacité de l'utilisation des sols) compense la plus grande obstruction par les bâtiments voisins, et ils précisent la règle suivante : la distribution de lumière naturelle est relativement peu affectée par la forme urbaine dans des conditions où l'on conserve à la fois les volumes construits et le taux de zones passives. Les auteurs proposent que cela provient du fait que le FVC moyen d'une forme urbaine est inversement proportionnel à la surface développée de cette forme urbaine (toits, façades et sol), surface qui est relativement stable dans les conditions énoncées ci-dessus.

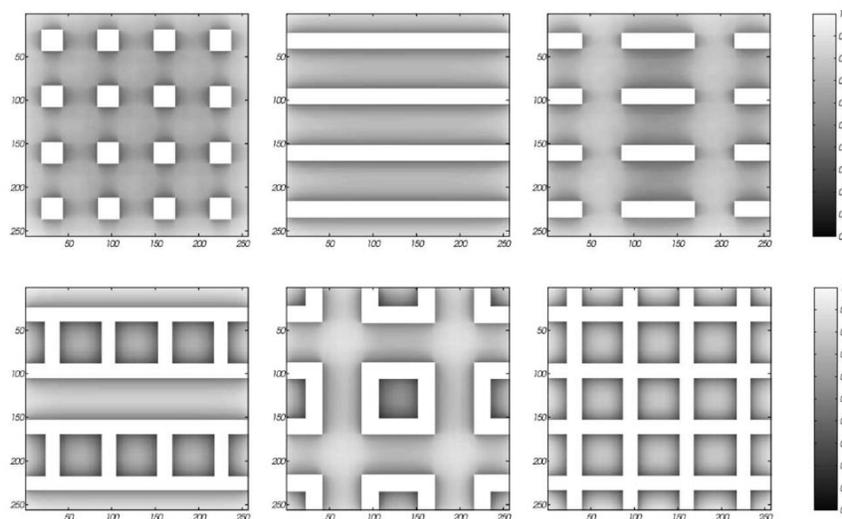


Figure 23 - Facteurs de Vue du Ciel au de six formes urbaines génériques (Ratti et al. 2003)

Dans cette même publication Ratti et al. (2003) proposent une comparaison de la performance des formes urbaines de type cours et blocs, et ce dans un contexte climatique chaud et aride. Les auteurs étudient trois formes urbaines différentes mais conservant la même surface de plancher (Figure 24). Le premier type choisi est un bâtiment à cours traditionnel qui est dupliqué sur toute une zone (cours). Le second type est constitué de blocs (micro-pavillons). Le troisième type est constitué de blocs deux fois plus hauts

(pavillons). L'analyse porte sur trois paramètres ; la compacité volumique, la densité d'ombre portée au sol et le facteur de vue du ciel.

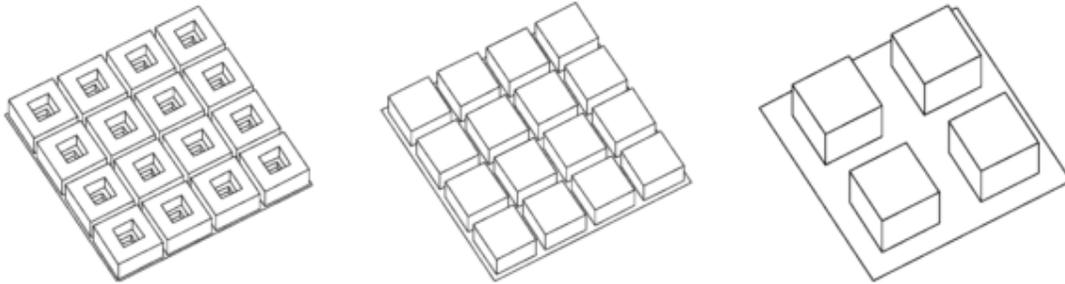


Figure 24 - Vue axonométrique (67,5m x 67,5m) d'un tissu traditionnel arabe (cours), et de deux structures basées sur des pavillons (3 étages au centre et 6 étages à droite) (Ratti et al. 2003)

La compacité rend compte du potentiel pour les interactions avec le climat. A compacité faible, les déperditions de chaleur pendant l'hiver sont plus importantes, mais les apports solaires sont en contrepartie plus importants. La forme « cours » présente ici le ratio surface sur volume le plus élevé (0,58), quand les formes « micro-pavillons » et « pavillons » présentent respectivement des ratios de 0,4 et 0,27. Ce résultat est à analyser à l'aune de deux considérations supplémentaires ; un tissu urbain à cours plus réaliste (continu) aurait un ratio surface sur volume beaucoup plus faible, et s'agissant de la régulation thermique dans ce type de tissu traditionnel, et dans un climat chaud et sec, le facteur le plus important est l'inertie thermique, pas la surface d'enveloppe. L'absorption et le stockage de la chaleur diurne dans la masse limitent les pics de température, et la nuit, la cour agit comme un puits de chaleur en permettant le refroidissement par échanges radiatifs avec la voûte céleste. En climat chaud et sec, un rapport surface sur volume relativement élevé combiné à une forte inertie thermique sont donc deux éléments fondamentaux pour la performance thermique des textures urbaines.

La densité d'ombre est évaluée au sol. Elle est la plus élevée dans les rues de la texture à cours (de manière symétrique, c'est là que l'accès solaire est le plus faible). Par contre l'accès solaire à l'intérieur des cours est deux fois plus élevé. Cela dénote une stratégie de ces textures urbaines tournées vers l'intérieur, vers le microclimat des cours. Les pavillons ne présentent pas cette capacité de créer et exploiter un microclimat interne.

Dans les trois formes étudiées, les pavillons maximisent le facteur de vue du ciel. On pourrait donc penser qu'ils minimisent l'ICU selon la formule de Oke (eq. 15). Cependant la réalité est inverse dans les climats chauds et secs, dans lesquels un faible FVC est bénéfique. Le phénomène d'ICU est en effet souvent décrit en termes de températures moyennes, ce qui masque le fait que l'ICU présente habituellement deux pics ; un maximum pendant la nuit et un minimum pendant le jour. Or dans les climats chauds et secs, les températures sont souvent significativement plus basses la nuit, et une augmentation des températures nocturnes peut être la bienvenue si elle s'accompagne d'une diminution des températures diurnes, enjeu pour lequel un faible FVC contribue positivement.

Cette étude met bien en avant les difficultés de l'analyse morphologique qui ne peut se limiter à des considérations géométriques, mais doit intégrer des considérations sur le climat local, les enjeux spécifiques qui lui sont associés et les stratégies urbaines et architecturales traditionnellement mises en

place pour y répondre. Notamment, l'application de considérations relatives à la compacité ou au facteur de vue du ciel valables pour des climats tempérés peuvent amener à des contre-sens sous d'autres climats.

Les auteurs concluent que lorsque l'on considère l'ensemble des effets environnementaux, les formes à cours sont supérieures aux bâtiments isolés dans les climats chauds et secs où elles sont universellement utilisées, et résumant les avantages des textures urbaines continues à cours pour les climats chauds et secs de la manière suivante :

- Une grande surface d'enveloppe (faible compacité) et une forte inertie thermique
- L'accès à la lumière du jour grâce aux cours et aux plans peu profonds des bâtiments
- Des espaces étroits procurant de l'ombre et un confort thermique amélioré

3.4.3.2. Etudes de formes urbaines réelles

Salat (2011) s'interroge sur la durabilité des textures urbaines découlant du modernisme par opposition aux formes urbaines historiques. Il propose ainsi une comparaison de trois archétypes modernistes extraits de la « ville radieuse » de Le Corbusier et de formes urbaines de Paris intra-muros, à l'aune de critères actuels de durabilité et de sobriété, à savoir ; densité du bâti, densité humaine, compacité volumique, admittance solaire, connectivité et fluidité du trafic. L'étude comparative d'archétypes extraits de la ville radieuse est justifiée du fait que l'auteur démontre par une analyse morphologique, que le modèle corbuséen constitue la matrice rigoureuse de nombreux développements actuels de grande envergure. Les objectifs de la « Ville Radieuse » étaient les suivants ; décongestionnement du centre-ville, accroissement de la densité, accroissement des moyens de circulation et accroissements des surfaces plantées. Les trois archétypes modernistes étudiés sont les principaux types constituant la « Ville Radieuse » ; gratte-ciel de 220m de haut sur plan cruciforme (Gratte-ciel), lotissement à redents d'une hauteur de 30m et d'une profondeur de 18m (Redents), et lotissement fermés alvéolés, bâtiment de 30m de haut et de 9 à 15m de profondeur (Alvéoles) (Figure 25).

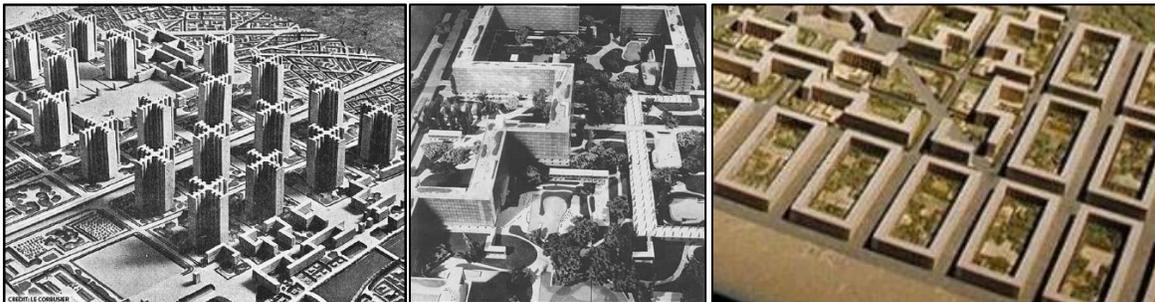


Figure 25 - Ville Radieuse - Gratte-ciel (gauche), Redents (centre) et Alvéoles (droite)

Les cinq types parisiens sélectionnés pour la comparaison représentent des formes de bâtiments et de rues qui ont évolué au cours du temps, et sont présentés au Tableau 12.

L'auteur propose une première comparaison énergétique entre les 5 types parisiens. Pour calculer les besoins de chauffage sont pris en compte les phénomènes physiques suivants : les déperditions par les parois, les déperditions par renouvellement d'air, les apports internes et les apports solaires. Différents facteurs entrent dans le calcul des besoins de chauffage d'un bâtiment ; la forme (orientation des façades, prospect, compacité, etc.), les aspects technologiques (taux de vitrage, transmission thermique des parois), et les conditions climatiques (degrés-heures, énergie solaire incidente etc.).

	< 1800	1850-1914	1915-1939	1968-1975	2000
Description	Bâti majoritaire d'avant 1800. Très dense et compact, immeubles mitoyens alignés sur rue, parcelles profondes et étroites, grandes cours à l'intérieur des îlots	Bâti haussmannien. Percée de grands boulevards, aménagement de parcs et de jardins, règles strictes sur la hauteur des bâtiments.	Bâti d'entre-deux guerres. Habitation à Bon Marché (HBM) à la périphérie de Paris, îlots à cours ouvertes, sans mitoyenneté.	Bâti des trente glorieuses. Formes simples et compactes, barres très espacées, bâtiments placés aléatoirement.	Bâti des années 1970-1980. Retour à un urbanisme plus traditionnel, îlot fermés et îlots ouverts
Sélection	200m x 200m	200m x 200m	200m x 200m	200m x 200m	200m x 200m
Besoins de chauffage avec le coefficient U de l'époque de construction kWh/(m ² .an)	158	129	234	181	31
Besoins de chauffage avec le coefficient U des années 2000 kWh/(m ² .an)	56	39	60	50	31

Tableau 12 - Besoins de chauffage de 5 types parisiens (Salat 2011)

On constate (Tableau 12) que le type haussmannien a des besoins de chauffage théoriques plus faibles que les types de l'entre-deux guerre et des trente glorieuses. Une analyse plus fine permet de mettre en évidence une mauvaise isolation de ces trois types de bâtiments, ce qui laisse penser que c'est bien la forme urbaine (tissu continu de hauteur moyenne, contre bâtiments hauts non mitoyens), qui explique cette performance. Le type le plus récent conduit à des économies d'énergie d'un facteur 6, en couplant une bonne isolation à un tissu continu de hauteur moyenne. Dans un second temps, afin de dégager le seul effet de la forme urbaine, les calculs sont refaits avec le même niveau d'isolation pour tous les types (niveau des années 2000). La forme d'îlots ouverts de 2000 reste la plus efficace, mais les îlots haussmanniens s'avèrent avoir une performance très proche. Les barres de l'après-guerre souffrent de leur trop grande taille et de formes trop simples et dispersées. On note que par le seul effet de la morphologie, les tours et barres ont un besoin de chauffage 1,6 fois supérieur aux îlots contemporains des années 2000.

Puis l'auteur propose la comparaison du type haussmannien avec les trois archétypes modernistes corbuséens selon cinq axes ; besoins de chauffage, compacité, densité, admittance et accès solaire, et volume passif. Nous résumons ci-dessous les principaux résultats.

- **Besoins de chauffage.** Avec un U (coefficient de transmission thermique) moyen des parois représentatif de l'époque à laquelle Le Corbusier a fait ses propositions, on constate que les types haussmanniens et « redents » ont des performances semblables (129 kWh/(m².an)), alors que les

« gratte-ciel » et les « Alvéoles » ont des besoins de chauffage plus élevés (respectivement 141 et 285 kWh/(m².an)). Avec une technologie d'isolation des années 2000, les types corbuséens consomment 30% de plus pour le chauffage que le type haussmannien.

- **Compacité.** La compacité est décrite par le ratio de la surface d'enveloppe sur le volume (S/V). Pour effacer l'effet de taille et ne garder que l'effet de forme, on considère l'indice $S/V^{2/3}$. Plus l'indice S/V est petit, plus la compacité est élevée. A priori plus un bâtiment est grand plus il est compact, cependant l'effet de taille induit en erreur puisqu'il ne permet pas de comparer les formes, on efface donc l'effet de taille grâce à l'exposant 2/3. Une fois supprimé le facteur de taille, on constate que le facteur de forme est nettement meilleur pour l'îlot haussmannien. A volume égal, les pertes sont plus de deux fois supérieures dans la typologie « gratte-ciel ». Ces résultats montrent qu'à taille égale, les types corbuséens ne nécessitent pas 30% de plus d'énergie pour le chauffage, mais plus du double.
- **La densité construite à l'îlot.** Le type haussmannien a une densité de 5,75, contre 1,28, 3,63 et 1,13 respectivement pour les types « redents », « gratte-ciel » et « Alvéoles ». La densité ne rime pas nécessairement avec hauteur et le tissu traditionnel continu de moyenne hauteur peut être une meilleure solution pour densifier la ville que la construction de tours.
- **L'admittance et l'accès solaire.** Pour évaluer l'accès au soleil et à la lumière, l'auteur évalue l'admittance et l'accès solaire. L'accès solaire est défini comme *l'équivalent paroi sud moyen* par m² de façade réelle. Il s'agit de calculer *l'équivalent paroi sud* de chaque paroi et de le multiplier par un coefficient associé au prospect (ombrage), de sommer, puis de diviser par la surface de paroi réelle totale. Ce paramètre permet de mesurer la quantité d'énergie solaire moyenne dont peut bénéficier un bâtiment. Il traduit les effets d'orientation des bâtiments et de masques solaires. L'admittance solaire compare quant à elle les *équivalents paroi sud* à la surface habitable, ce qui permet de prendre en compte la profondeur du bâtiment et la possibilité réelle de faire bénéficier l'intérieur de l'énergie dont profitent les parois. Pour calculer l'admittance solaire, on divise le coefficient d'accès solaire par la surface habitable. Le tissu haussmannien présente un meilleur accès solaire et une meilleure admittance solaire que les archétypes corbuséens.
- **La zone passive.** Les tours bénéficient de moins de lumière et d'apports d'énergie solaire sur leur enveloppe, et cet effet est aggravé par leur mauvais ratio de zone passive. Il est de 86% pour les gratte-ciel et de 68% pour les immeubles à redents.

Les différentes étapes de cette étude ont permis de démontrer que dans un tissu urbain mixte continu traditionnel de hauteur moyenne (et par rapport à des tours isolées), les besoins de chauffage sont moindres, les densités sont nettement plus élevées, et l'accès et l'admittance solaire sont supérieurs.

Dans une recherche menée par la *London School of Economics* et l'*European Institute For Energy Research* (EIFER & LSE Cities 2011), 20 échantillons urbains sont étudiés dans 5 villes afin de définir les caractéristiques urbaines dominantes de ces différentes formes. L'objectif final de l'étude consiste à révéler des corrélations entre des paramètres morphologiques tels que la densité, la compacité volumique, la hauteur des bâtiments ou encore le coefficient d'emprise au sol, et les besoins de chaleur de la forme urbaine. Cette étude a permis de confirmer l'importance de l'influence de la forme urbaine avec la mise en évidence de variations de l'ordre d'un facteur 7 entre les différentes formes. Les auteurs concluent que la hauteur des bâtiments est l'indicateur le plus performant pour estimer les besoins de chaud à l'échelle urbaine, les besoins de chaud diminuant quand la hauteur des bâtiments augmente (Figure 26). La compacité est le second indicateur le plus performant, les besoins de chaud diminuant

quand la compactté augmente. La densité enfin est également considérée comme un indicateur pertinent, les échantillons les plus denses présentant des besoins de chaleur plus faibles. Les auteurs par contre ne proposent pas d'étude des interrelations entre ces trois paramètres.

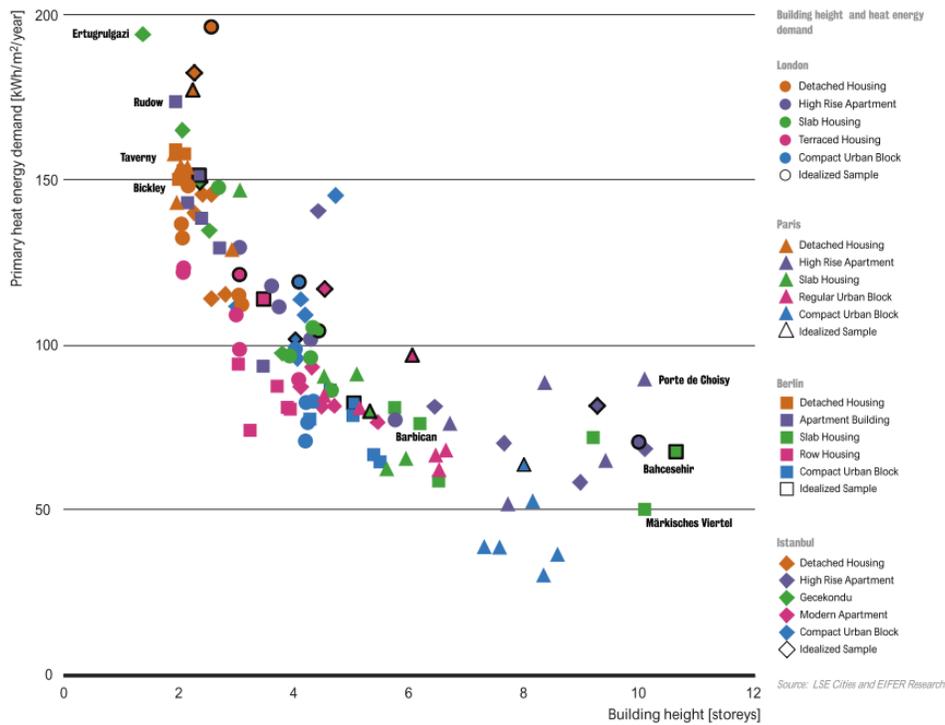


Figure 26 – Hauteur des bâtiments et besoins de chauffage (EIFER & LSE Cities 2011)

Martins et al. (2013) proposent une étude des formes urbaines de la ville de Maceió (Brésil) dans l'objectif d'aider à la prédiction des besoins énergétiques à l'échelle du quartier dans le contexte d'une ville brésilienne (besoin de climatisation et besoins d'éclairage artificiel). Les indicateurs morphologiques proposés par (Adolphe 2009), et présentés précédemment (Figure 16) sont utilisés dans le cadre de cette analyse. Le CES et le COS y sont ajoutés comme mesures de la densité. La première étape de ces travaux a consisté à calculer l'ensemble de ces indicateurs grâce à un logiciel de système d'information géographique (SIG). Les résultats morphologiques obtenus pour toute la ville de Maceió et selon une grille de 500m par 500m ont ensuite été analysés via une analyse en composantes principales qui a permis d'identifier les indicateurs les plus significatifs pour décrire la forme urbaine ; la hauteur moyenne des bâtiments (pondérée par les emprises au sol), la compacité volumique, la contiguïté, la rugosité, le COS, le CES et la porosité. Puis une analyse de type *clustering* sur ces 7 paramètres a permis de définir une typologie des quartiers de Maceió contenant cinq types dont les caractéristiques moyennes sont présentées Figure 27.

Classes	Average weighted height	Compactness	Contiguity	Roughness	Floor area ratio (FAR)	Plot ratio (PR)	Porosity
1 Sparsely built	4,22	4,75	0,07	0,10	0,08	0,08	0,97
2 Open-set mid-rise	9,11	5,18	0,02	0,25	0,88	0,22	0,96
3 Colonial compact centre	6,29	3,87	0,38	2,73	2,38	0,74	0,66
4 Modern high-rise	17,0	4,94	0,22	1,57	4,15	0,49	0,90
5 Densely built low-rise	5,15	3,66	0,03	1,71	0,75	0,56	0,70

Figure 27 – Types morphologiques de la ville de Maceió (Martins et al. 2013)

Les 5 types ainsi définis ont ensuite été soumis à des simulations de leurs besoins énergétiques (climatisation et éclairage artificiel). Les résultats mettent en évidence la sensibilité de l'évaluation des besoins énergétiques aux paramètres suivants ; COS, hauteur moyenne des bâtiments (pondérée par les emprises au sol), compacité volumique et rapport d'aspect des rues. Les auteurs concluent que pour les contextes climatiques tels que celui de Maceió, la hauteur moyenne des bâtiments et le COS ont un effet important sur les besoins énergétiques. En comparant les types de forme urbaine, une différence de 58% de la demande d'énergie a pu être mise en évidence, en raison de l'effet combiné de la densification et de la verticalisation.

S'appuyant sur les travaux de Berghauser Pont et Haupt, Rodríguez-Álvarez (2016) propose une méthode d'évaluation des besoins de chaud, de froid et d'éclairage artificiel des bâtiments, à l'échelle du quartier et applicable aux formes urbaines réelles. Cette méthode est baptisée UEIB (*Urban Energy index for Buildings*). La démarche explorée par l'auteur consiste à calculer à partir du modèle 3D d'un échantillon urbain, une forme urbaine générique équivalente du point de vue des besoins thermiques et de l'éclairage naturel, puis à réaliser des simulations (besoins thermiques et éclairage) sur un bâtiment représentatif de cette forme urbaine générique équivalente. Ces travaux sont basés sur l'hypothèse selon laquelle les besoins en moyenne sur l'ensemble des bâtiments d'une zone urbaine sont analogues aux besoins d'une forme urbaine générique (réseau régulier de parallélépipèdes) dont certains paramètres spatiaux, présentés à la Figure 28 sont équivalents aux paramètres moyens du quartier réel. Cette hypothèse reprend l'intuition de Berghauser Pont & Haupt (2005) sur la pertinence de la densité telle que définie dans Spacemate pour l'évaluation de la performance de la forme urbaine, et la complète avec de nouveaux critères, notamment la conservation de l'orientation, et des angles d'obstruction. L'auteur a ensuite développé un modèle de thermique de bâtiment permettant la prise en compte du contexte urbain à partir des paramètres moyens du quartier. Dans ce modèle, l'environnement urbain n'influence que le flux solaire direct. Le flux solaire diffus est considéré comme homogène dans les rues canyon et les inter-réflexions sont prises en compte de manière forfaitaire (comme une fraction de la somme des flux solaires directs et diffus). Le modèle ne prend pas en compte l'effet de l'environnement urbain sur les échanges convectifs, ni les échanges GLO au sein de la scène urbaine. Enfin, il ne représente pas la végétation, les sols naturels et les plans d'eau.

L'auteur a testé sur 28 échantillons urbains correspondant à une grande variété de formes urbaines, la capacité des quartiers génériques équivalents à représenter les quartiers réels en termes de besoins thermiques et d'éclairage. Pour chacun des échantillons, les besoins ont été évalués une première fois en simulant chaque bâtiment composant le quartier avec le logiciel Climatelite, puis une seconde fois en simulant le quartier équivalent avec Climatelite. Chaque échantillon a été simulé pour 5 climats et 5 types

de bâtiments, ce qui donne environ 4000 simulations. Le bon accord entre les résultats obtenus selon les deux approches ($r^2=0,91$) valide la capacité du quartier équivalent à produire des résultats pertinents.

En matière d'applicabilité de la transformation en quartier équivalent, les auteurs précisent que la taille minimum de l'échantillon doit être de 100m x 100m, et que chaque échantillon doit contenir plusieurs blocs et plusieurs rues.

Summary of the key urban parameters that need to be retained in the notional grid for a meaningful energy assessment.

Parameter	Interpretation		Units
Area	Gross area of the urban sample	A	m ²
Ground Floor Area	Built area on the ground floor	GFA	m ² /m ²
Total Floor Area	Total built-up area	TFA	m ² /m ²
Floor Space Index	It represents the gross built up area per land unit for all uses and floors above ground level. It is measured in m ² /m ² and it is a typical standard in planning documents ($FSI = TFA/A$)	FSI	m ² /m ²
Ground Space Index	It indicates the proportion of land that is covered by buildings ($GSI = GFA/A$)	GSI	m ² /m ²
Compactness Ratio	Although it is not a typical planning standard, it is relevant to the energy performance. It is defined as the proportion of exposed envelope area (roof and external walls) to the floor area ($Comp = Env/TFA$)	Comp	m ² /m ²
Perimeter	Sum of the perimeter of all buildings	P	m
Envelope area	Ratio between the perimeter on the main orientation and its orthogonal ($Pn-s/Pe-w$, where $Pn-s$ = perimeter on main orientation; $Pe-w$ = perimeter on secondary orientation)	Env	m ²
Orientation ratio	Ratio between the perimeter on the main orientation and the perimeter on its orthogonal ($Pn-s/Pe-w$, where $Pn-s$ = perimeter on main orientation; $Pe-w$ = perimeter on secondary orientation)	Or	
Obstruction angle	Average obstruction angle in the two main axes, as detailed in Section 2.2.1	θ	Degrees
Volume	Total built-up volume	V	m ³
Building height	Weighted average building height in the study area	h	m
Number of floors	Average number of floors in the study area	f	
Glazing ratio	Average wall to window ratio in all the elevations of the study area	Gr	%
Construction type	A categorical definition of the typical building construction, especially regarding thermal transmittance	Ct	

Figure 28 – Paramètres urbains décisifs pour l'évaluation des besoins de chaud, de froid et d'éclairage (Rodríguez-Álvarez 2016)

3.5. CONCLUSIONS

Dans ce chapitre d'état de l'art nous avons présenté les interactions entre forme urbaine, climat et énergie. Nous avons détaillé les approches de modélisation existantes, permettant d'une part l'étude du microclimat urbain à l'échelle du quartier et d'autre part l'étude de l'influence du microclimat urbain sur les potentiels bioclimatiques des bâtiments. Nous avons illustré l'ensemble de ces approches et des apports qu'elles permettent au travers d'études principalement centrées sur l'influence de l'environnement urbain sur l'énergétique des bâtiments, et à l'échelle du quartier. Ces études permettent de dégager quelques résultats généraux, tels que l'importance d'une modélisation fine des échanges GLO avec le ciel et au sein de la scène urbaine, ou encore l'influence relativement limitée de l'évaluation détaillée des conditions de vent pour l'étude des besoins thermiques des bâtiments en milieu urbain (mise à part pour l'étude des besoins de climatisation de bâtiments non isolés). Nous avons ensuite présenté des approches d'évaluation des formes urbaines basées sur leur analyse morphologique. De nombreux indicateurs ou systèmes d'indicateurs existent dans la littérature, mais les études de formes urbaines réelles et génériques par le biais de ces indicateurs mettent en évidence de grandes difficultés à déterminer des principes généraux ou des lois empiriques qui aient une portée universelle sur la base de ces indicateurs.

Il est donc clairement admis et documenté que la morphologie urbaine est un levier de conception de l'environnement construit essentiel pour assurer sa performance énergétique, et que ce levier doit se traiter dès les phases amont de conception d'un projet d'aménagement à l'échelle du quartier. Cependant, les deux approches évoquées (modélisation et analyse morphologique) montrent leurs limites pour servir cet objectif. Une piste apparaît au travers des travaux de Rodríguez-Álvarez (2016), qui consiste à travailler sur la réduction d'une forme urbaine réelle à évaluer en quartier générique équivalent, qui via la conservation de certains paramètres morphologiques bien choisis, assure la conservation des potentiels

bioclimatiques. La forme urbaine générique peut ensuite être évaluée via par exemple une approche de modélisation simplifiée.

Chapitre 4. Développement et analyse d'un modèle simplifié pour l'évaluation de l'énergie grise et de l'empreinte carbone des bâtiments⁴

4.1. INTRODUCTION

L'analyse des impacts environnementaux de l'environnement bâti est abordée par une variété de méthodologies selon l'échelle d'étude. À l'échelle des matériaux de construction et à l'échelle du bâtiment, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthodologie clairement acceptée pour l'évaluation quantitative des matériaux / bâtiments sur toute leur durée de vie en tenant compte des impacts amont (Anderson et al. 2015). Comme mentionné précédemment au Chapitre 2, différentes revues critiques ont été réalisées sur les applications de l'ACV dans l'industrie de la construction (Buyle et al. 2012; Cabeza et al. 2014; Ortiz et al. 2009; Karimpour et al. 2014). Ces revues critiques concernant les échelles du matériau et du bâtiment, ainsi que notre propre revue critique à l'échelle du quartier présentée au Chapitre 2 (Lotteau et al. 2015) soulignent le fait que les études de cas sont difficilement comparables en raison de leurs spécificités (types de bâtiments, climat, exigences de confort, réglementations locales, etc.). Néanmoins, des tendances sont identifiées telles que la prédominance de la phase d'exploitation (en particulier en raison des consommations d'énergie liées au chauffage et la climatisation) et l'augmentation de la part et de la valeur absolue de l'énergie grise (et des émissions de GES associées) relative aux matériaux de construction dans le contexte de la production de bâtiments toujours moins consommateurs d'énergie en phase d'exploitation.

Notre revue critique de l'ACV à l'échelle du quartier nous a permis de souligner les principaux défis liés à l'application de l'ACV à cette échelle. L'un des enjeux majeurs réside dans la collecte ou la production des données d'inventaire de cycle de vie (ICV) pour les bâtiments, et particulièrement en ce qui concerne les matériaux de construction. Deux familles d'approches sont couramment mises en œuvre pour produire les ICV relatifs au matériaux de construction des bâtiments à l'échelle du quartier (Lotteau et al. 2015). (1) Une approche descendante qui s'appuie sur des données moyennes pour des archétypes de bâtiments (dans ce cas, seules les surfaces de plancher de chaque type de bâtiment sont collectées et des données génériques correspondantes sont utilisées). Ce type d'approche est souvent mis en œuvre soit dans le cadre d'évaluation de quartiers existants de grande dimension, soit dans le cadre d'évaluations réalisées en phase amont de conception de projets d'aménagement, c'est-à-dire lorsque les bâtiments n'ont pas encore été conçus et que seuls leurs gabarits sont connus à travers le plan masse du quartier. (2) Une approche ascendante qui consiste à sommer les ICV détaillés de chaque bâtiment composant le quartier. Ce second type d'approche ne peut être réalisé qu'en phase aval du processus de conception d'un projet d'aménagement, lorsque davantage d'informations relatives aux bâtiments ont été spécifiées.

Les deux familles d'approches montrent des limites pour l'évaluation de plans masse de projets de développement urbain, alors même que l'établissement du plan masse est une étape critique qui conditionne en partie la performance énergétique globale d'un quartier. Les approches descendantes ne sont pas sensibles à la morphologie urbaine, et notamment à la forme des bâtiments. Les approches

⁴ Ce chapitre est adapté de l'article soumis à publication Lotteau, M., Loubet, P., Sonnemann, G., 2017. An analysis to understand how the shape of a concrete residential building influences its embodied energy and embodied carbon. *Energy and Buildings*, *Submitted*

ascendantes ne sont pas en adéquation avec les données disponibles, et nécessite du temps et des ressources rarement disponibles à ce stade des projets.

L'influence de la forme du bâtiment sur l'énergie grise (EG) et l'empreinte carbone (EC) des bâtiments a rarement été étudiée en tant que telle. À partir d'une revue systématique de la littérature, (Pomponi & Moncaster 2016) ont compilé une liste de stratégies très diverses pour l'atténuation et la réduction de l'EC des bâtiments, et aucune de ces stratégies ne fait explicitement référence à la forme des bâtiments. En fait, seules quelques études abordent spécifiquement ce sujet, et elles se concentrent la plupart du temps sur l'influence de la hauteur du bâtiment. Ainsi (Treloar et al. 2001) proposent une analyse de cinq immeubles de bureaux (bâtiments réels) variant de quelques étages à plus de 50 étages, dans le but d'étudier l'influence de la hauteur des bâtiments sur l'EG à. Les résultats montrent que l'EG (par m² de plancher) des immeubles de grande hauteur est environ 60% supérieure à celle des immeubles de faible hauteur. Ceci s'explique par le recours à des matériaux à forte intensité énergétique pour répondre aux exigences structurelles (résistance à la charge et résistance au vent). Le même type d'étude a été mené par (Aye et al. 1999) sur des bâtiments commerciaux génériques de faible hauteur. Les auteurs trouvent également une corrélation entre l'EG et la hauteur. Partant de bâtiments de faible hauteur, l'augmentation de la hauteur induit une amélioration de la compacité (ratio surface d'enveloppe sur volume) qui conduit à une diminution de l'EG par m² de plancher. Puis lorsque l'on approche la dizaine d'étages, les auteurs montrent qu'une « prime à la hauteur » apparaît conduisant à une augmentation de l'EG exprimée par m² de plancher. Plus récemment, (Foraboschi et al. 2014) ont réalisé une étude détaillée de l'EG des structures de bâtiments de grande hauteur. Pour ce faire, les auteurs ont défini une structure de référence pour des bâtiments de 20 à 70 étages et pour différents types de planchers. Pour permettre une comparaison entre les bâtiments, chaque configuration a été dimensionnée pour répondre exactement aux mêmes exigences en termes de comportement structurel. Les résultats montrent que les planchers consomment presque toujours la majorité de l'EG (par rapport aux autres éléments de la structure : noyau central, poteaux et poutres), et mettent également en évidence l'existence d'une « prime à la hauteur ». (Waldron et al. 2013) soulignent également des différences significatives entre différents types de bâtiments (immeubles de faible hauteur, hauteur moyenne et grande hauteur) en termes d'EG de l'enveloppe. Sur la base d'une revue de la littérature, les auteurs montrent également que l'EG associée à la structure du bâtiment varie d'un facteur trois entre les différents types de bâtiments.

Certains auteurs ont proposé des modèles pour la production des données d'ICV de bâtiments (matériaux) compatibles avec l'application de l'ACV pour l'évaluation de plans masse de projets d'aménagement. Même si leur objectif principal est d'étudier l'influence du choix des matériaux de construction et de leurs épaisseurs, les applications de ces modèles sur des études de cas fournissent des pistes supplémentaires concernant l'influence de la forme des bâtiments sur l'énergie grise et sur l'empreinte carbone. Ainsi (Basbagill et al. 2013) proposent un modèle pour l'évaluation de l'EG des bâtiments à l'échelle du quartier en fonction de la description d'un groupe de bâtiments identiques grâce à quelques paramètres d'entrée: nombre de bâtiments, nombre d'étages, dimensions de l'emprise au sol des bâtiments, taux de vitrage des façades. Le calcul de l'EG est automatisé grâce à un modèle 3D. Puis, à surface plancher constante, le modèle est exécuté sur des milliers de configurations de bâtiments admissibles en termes de forme, de matériaux et d'épaisseurs de matériaux pour fournir aux concepteurs une mesure du potentiel de réduction de l'EG associé à des décisions telles que le choix des matériaux et de leurs épaisseurs pour chaque composant de bâtiment. Bien que la méthodologie repose sur l'exploration des variations de la forme des bâtiments, aucune analyse de son influence n'est fournie par les auteurs. (Davila & Reinhart

2013) proposent également un modèle basé sur la modélisation 3D simplifiée d'un plan masse de quartier pour l'évaluation de l'EG des bâtiments. Les bâtiments sont décomposés en éléments constructifs (toiture, murs extérieurs, plancher bas, etc.) dont les quantités (surfaces) sont extraites du modèle 3D. Ces quantités sont ensuite combinées avec une base de données de facteurs d'énergie grise. Une application de ce modèle sur trois scénarios urbains différents en termes de coefficient d'occupation des sols (COS) montre que l'EG augmente avec le COS. (Trigaux et al. 2014) présentent un autre modèle pour évaluer l'impact environnemental de groupes de bâtiments, ainsi que de l'infrastructure routière attenante. Les frontières du système comprennent tout le cycle de vie des bâtiments et des routes. Une étude de cas est menée sur quatre quartiers génériques composés de maisons individuelles, de maisons jumelées, de maisons mitoyennes et de bâtiments résidentiels collectifs. Les résultats (score unique) pour le contributeur « matériaux de construction » montrent que les maisons individuelles induisent 50% d'impacts supplémentaires par rapport aux maisons mitoyennes et 30% d'impacts supplémentaires par rapport aux bâtiments résidentiels collectifs. (Gardezi et al. 2016) proposent quant à eux un outil de prévision pour l'EC des maisons en Malaisie. Plusieurs types de maisons ont été évalués par l'adoption d'un cadre d'ACV partiel. Puis une régression multi-variables est utilisée pour produire un modèle prédictif de l'EC basé sur les paramètres suivants : surface plancher, rapport longueur / largeur du bâtiment, volume et poids du bâtiment. A système constructif fixe, ce modèle met en évidence le fait que l'EC dépend fortement des paramètres de forme. Toutefois, aucune analyse détaillée de l'effet spécifique de chaque paramètre d'entrée n'est présentée.

A notre connaissance, aucune étude ne propose une analyse détaillée de l'influence des paramètres de forme d'un bâtiment sur son énergie grise et son empreinte carbone. Dans ce contexte, notre objectif est double : (1) proposer un modèle simplifié pour l'évaluation de l'EG et de l'EC d'un bâtiment, adapté aux évaluations effectuées au stade du plan masse d'un projet d'aménagement urbain ou à la phase esquisse d'un projet de construction, et (2) étudier l'influence des paramètres de forme d'un bâtiment sur son EG et son EC. Le modèle simplifié proposé dans ce chapitre est un modèle à l'échelle du bâtiment, bien qu'il soit destiné à être utilisé dans le cadre d'évaluation à l'échelle du quartier. Cela signifie qu'il doit être appliqué sur chaque bâtiment du quartier. Ce modèle permet une approche hybride entre les approches ascendantes et descendantes. Il tire le meilleur parti des données disponibles au stade du plan masse d'un projet d'aménagement. La forme réelle de chaque bâtiment est prise en compte et pas uniquement sa surface de plancher (approche ascendante), et des données génériques liées matériaux et aux systèmes constructifs sont utilisées (approche descendante).

Nous présentons d'abord le modèle conceptuel et les données associées pour évaluer l'énergie grise et l'empreinte carbone d'un bâtiment. Ensuite, nous détaillons les méthodes mises en œuvre pour réaliser une analyse de sensibilité et une analyse de contribution pour deux types de formes de bâtiments génériques évalués avec le modèle. Les résultats permettent de comprendre l'influence relative des différents paramètres de forme, ainsi que la contribution des différents éléments du bâtiment à l'EG et à l'EC. Bien que l'approche puisse être répétée pour tout autre type de bâtiments, systèmes constructifs et contextes nationaux, il faut noter que les travaux présentés ici concernent des bâtiments résidentiels collectifs en béton et dans le contexte français.

4.2. MATERIELS ET METHODES

4.2.1. Modélisation de l'énergie grise et de l'empreinte carbone des bâtiments

Nous présentons dans cette section notre approche de modélisation dont l'objectif est de fournir aux urbanistes un outil leur permettant de comprendre l'influence de leurs choix en termes de morphologie urbaine sur l'EG et l'EC des bâtiments. Ce modèle conceptuel est dérivé de l'approche de (Davila & Reinhart 2013) et repose sur la décomposition des bâtiments en éléments fonctionnels et sur le développement d'une base de données de facteurs associés : facteurs d'énergie grise (FEG) et facteurs d'émissions grises de GES (FGES).

La Figure 29, adaptée de (Basbagill et al. 2013), représente schématiquement le cycle de vie complet d'un bâtiment. La zone grisée correspond aux phases qui sont incluses dans l'approche développée dans ce chapitre : l'extraction des matières premières, la production des matériaux de construction, la maintenance et la fin de vie. L'usage des bâtiments sera en partie couvert au travers des besoins de chauffage et de froid par les travaux présentés au Chapitre 6. Il convient également de noter que ces développements sont destinés à être utilisés dans le contexte de l'application de l'ACV à l'échelle du quartier, mais qu'ici seuls les bâtiments sont comptabilisés. L'infrastructure routière et les réseaux ne relèvent pas du périmètre de ce modèle (ils sont déjà pris en compte par l'outil NEST dans lequel nous souhaitons intégrer nos travaux). Par ailleurs L'ACV est par définition une méthode d'évaluation multicritères. Dans les travaux présentés ici, nous adoptons une approche monocritère de l'ACV. Nous nous concentrons sur l'énergie grise et les émissions grises de GES (empreinte carbone), cependant les bases méthodologiques et en particulier les données d'inventaire sont les mêmes pour l'étude d'autres catégories d'impact.

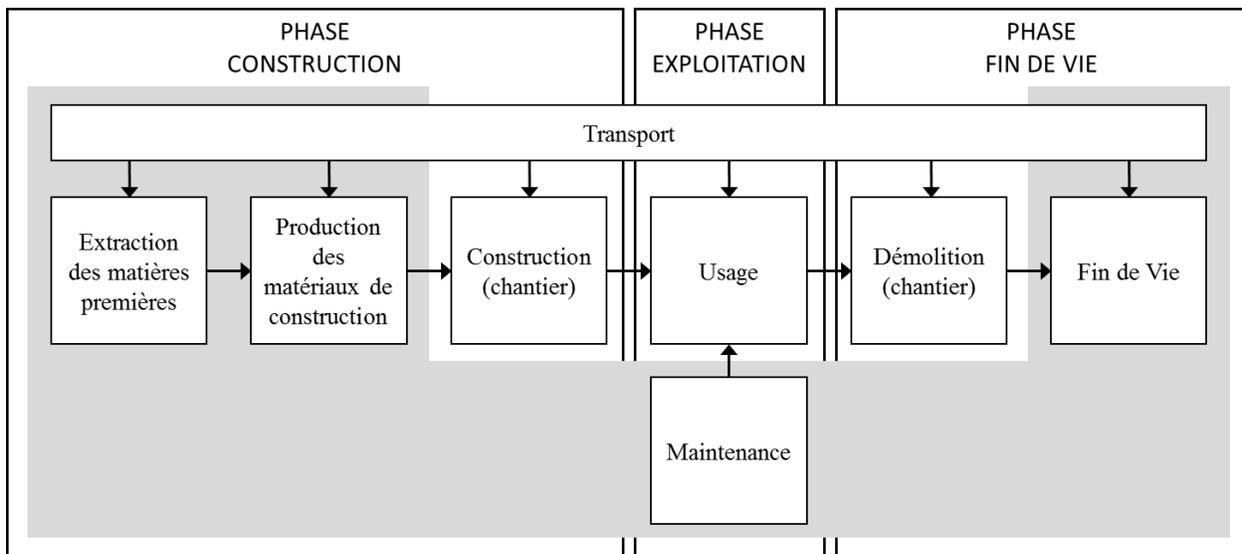


Figure 29 - Les phases du cycle de vie d'un bâtiment ; la zone grisée correspond aux phases couvertes par le modèle

Le modèle tel que nous le présentons porte sur les bâtiments résidentiels collectifs. La décomposition des bâtiments en éléments fonctionnels a été réalisée de sorte que les matériaux de construction participant aux fonctions suivantes soient pris en compte: la structure, l'enveloppe, l'isolation thermique et le cloisonnement.

Dans ce cadre (bâtiments résidentiels collectifs) nous proposons 12 éléments fonctionnels (Figure 30). Chacun d’entre eux a été défini (en termes de matériaux les constituant – Tableau 13) dans l’objectif d’être représentatif des tendances actuelles de la construction en France (Cerqual 2012; Cerqual 2014; CIMbéton 2009). Il faut noter que cette étape du processus pourrait être répétée pour d’autres modes de construction et/ou d’autres types de bâtiments. Les éléments fonctionnels pris en compte dans cette approche représentent typiquement environ 60% de l’EG d’un bâtiment et 70% de son EC (Lebert et al. 2013).

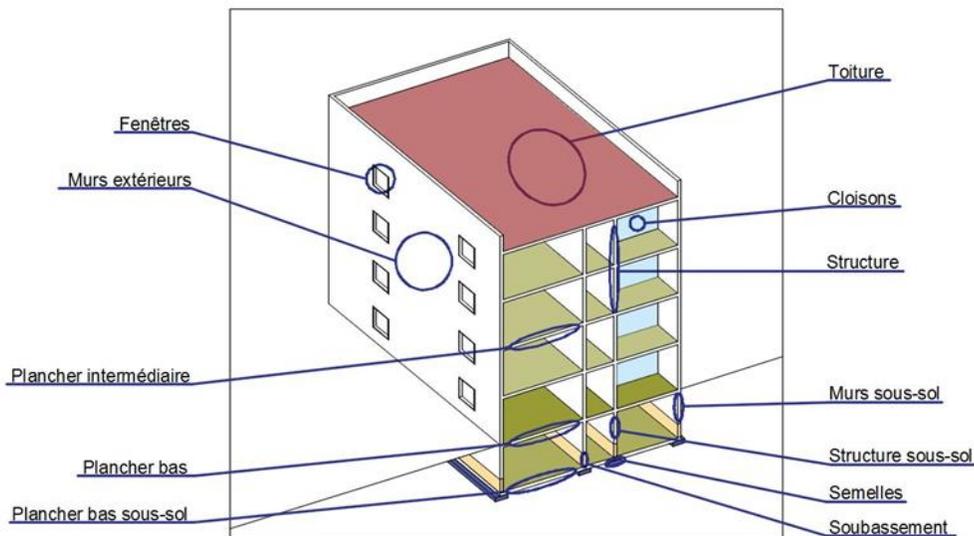


Figure 30 - Décomposition d’un bâtiment résidentiel collectif en éléments fonctionnels

Connaissant les quantités (Q_i) de l’élément fonctionnel i , et les facteurs associés FEG_i et $FGES_i$, l’EG et l’EC d’un bâtiment sont calculées selon les équations eq. 22 et eq. 23.

$$EG = \sum_i FEG_i * Q_i \quad \text{eq. 22}$$

$$EC = \sum_i FGES_i * Q_i \quad \text{eq. 23}$$

Les facteurs d’énergie grise (FEG) et les facteurs d’émissions grises de GES (FGES) pour chaque élément fonctionnel ont été compilés dans une base de données (Tableau 13). Pour la plupart des produits de construction composant les éléments fonctionnels, les données d’ICV sont tirées de Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) qui sont les déclarations environnementales de produits françaises pour les produits de construction. Les FDES sont basées sur la norme française NF P 01-010 (AFNOR 2004) qui intègre les principes des normes ISO 14000 (AFNOR 2006; ISO 2006a; ISO 2006b). Elles sont disponibles en ligne à partir de la base de données INIES (INIES 2016). Pour les éléments en béton, nous avons utilisé l’outil en ligne BETie (SNPBE 2011), permettant la production de FDES paramétrées pour les éléments en béton armé avec des dimensions spécifiques. Les données d’ICV relatives à l’acquisition des matières premières, la production de matériaux de construction, le remplacement et la fin de vie sont directement

disponibles dans les FDES. Nous utilisons une durée de vie fixe de 50 ans pour le bâtiment. Le remplacement des matériaux de construction est pris en compte pour les matériaux ayant une durée de vie typique inférieure à 50 ans. Finalement, la base de données compile les facteurs exprimés par m² d'élément fonctionnel, à l'exception de la structure verticale pour laquelle les facteurs sont exprimés par m³ de béton armé. Il est important de rappeler à ce stade que ces données, calculées à partir des FDES, sont adaptées au contexte français. Ainsi, elles dépendent de certaines spécificités nationales telles que la composition du mix énergétique français, les distances de transport et les scénarios de fin de vie (incinération, mise en décharge et réutilisation) qui sont relatifs au contexte national.

Elément fonctionnel	Composition	Facteur d'Energie Grise (FEG)	Facteur d'Emissions Grises de GES (FGES)
Fondations - Semelles	Fondations superficielles – semelles en béton armé de section 80cm*40cm	2749 MJ/m ³	272 kgCO _{2eq} /m ³
Fondations - Soubassement	Voiles béton armé : 20 cm	638 MJ/m ²	62 kgCO _{2eq} /m ²
Sous-sol – Plancher bas	Dalle béton armé sur terre-plein : 20 cm	547 MJ/m ²	54 kgCO _{2eq} /m ²
Sous-sol - Structure	Voiles béton armé : 20 cm	3190 MJ/m ³	311 kgCO _{2eq} /m ³
Sous-sol - Murs	Voiles béton armé : 20 cm	638 MJ/m ²	62 kgCO _{2eq} /m ²
Plancher bas	- Dalle béton armé : 25 cm - Isolant laine de roche: 16 cm	908 MJ/m ²	85 kgCO _{2eq} /m ²
Planchers intermédiaires	Dalle béton armé : 20 cm	609 MJ/m ²	67 kgCO _{2eq} /m ²
Toit	- Dalle béton armé : 20 cm - Pare-vapeur bitumineux - Isolant polyuréthane : 20 cm - Revêtement d'étanchéité à base d'asphalte - Dalles de toiture terrasse en béton	1731 MJ/m ²	134 kgCO _{2eq} /m ²
Murs extérieurs	- Voiles en béton armé : 20 cm - Isolant laine de verre : 14 cm - Doublage : plaques de plâtre 1.3 cm	766 MJ/m ²	67 kgCO _{2eq} /m ²
Fenêtres	Fenêtres PVCS double vitrage	3440 MJ/m ²	137 kgCO _{2eq} /m ²
Structure	Voiles béton armé : 20 cm	3190 MJ/m ³	311 kgCO _{2eq} /m ³
Cloisons	Plaques de plâtre (2*1,3 cm) sur ossature métallique	630 MJ/m ²	28 kgCO _{2eq} /m ²

Tableau 13 - Composition des éléments fonctionnels du bâtiment résidentiel collectif et facteurs de caractérisation associés

Ce modèle basé sur la décomposition d'un bâtiment en éléments fonctionnels est destiné à être implémenté dans un environnement de modélisation 3D à partir duquel les quantités d'éléments fonctionnels sont automatiquement extraites. Les quantités de certains éléments fonctionnels (planchers, murs et toits) sont des extractions directes du modèle 3D. Les calculs des quantités de fenêtres, de structure et de cloisons nécessitent quant à eux la définition de paramètres d'entrée supplémentaires,

respectivement; (1) le taux de vitrage, (2) la densité de structure (exprimée en mètres cubes d'éléments de structure verticaux par m² de plancher), (3) la densité de cloisonnement (exprimée en mètre linéaire d'élément de cloisonnement par m² de plancher). Par ailleurs, dans notre modèle, le dimensionnement des fondations dépend de la qualité géotechnique du sol (bon, moyen ou mauvais) et est basée sur la masse du bâtiment et le taux de travail du sol, selon eq. 24.

$$S = g * M / S_{wr} \quad \text{eq. 24}$$

où S est la surface de la semelle, g l'accélération de la pesanteur, M est la masse du bâtiment, et S_{wr} le taux de travail du sol.

4.2.2. Méthodes d'analyse de sensibilité et d'analyse de contribution

4.2.2.1. Mise en œuvre du modèle

Afin d'étudier le comportement de notre modèle et le détail de l'influence de la forme d'un bâtiment sur son EG et son EC, nous avons procédé à une analyse de sensibilité et une analyse de contribution sur deux types de formes urbaines génériques, les « Blocs » et les « Cours » (Figure 31). Ces analyses nécessitant l'évaluation d'un grand nombre de configurations de bâtiments, nous avons implémenté notre modèle dans un environnement de modélisation 3D paramétrique : un modèleur 3D, Rhinoceros (McNeel 2013b), et un plugin pour la modélisation paramétrique, Grasshopper (McNeel 2013a). Grasshopper permet également de réaliser des opérations géométriques et mathématiques.

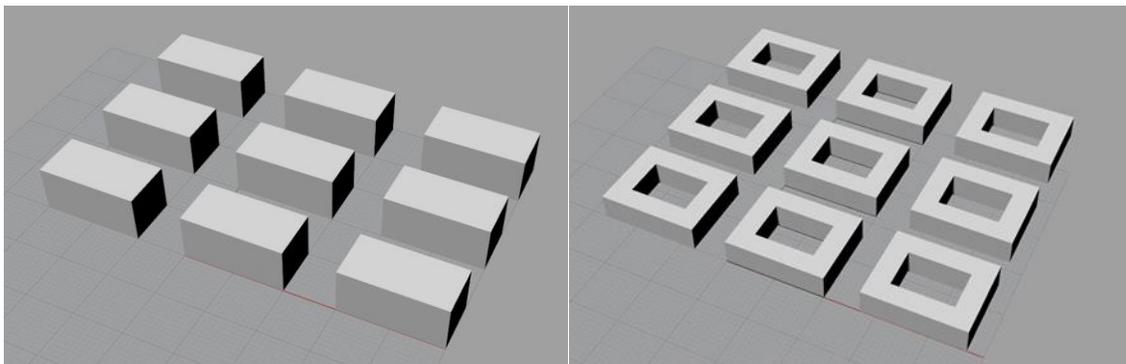


Figure 31 - Formes générique de bâtiments utilisées pour l'analyse de sensibilité et l'analyse de contribution ; Bloc (à gauche) et Cour (à droite)

La géométrie « Bloc » est un bâtiment à base rectangulaire. La géométrie « Cour » est également un bâtiment à base rectangulaire mais comprenant une cour intérieure. La production des modèles 3D des deux types de bâtiments a été automatisée grâce à leur modélisation paramétrique dans Grasshopper. Les contours des bâtiments de type « Bloc » sont définis grâce aux paramètres de forme suivants: dimensions horizontales du bâtiment selon les axes X et Y, nombre de niveaux, hauteur d'un niveau et hauteur du soubassement. Dans le cas des bâtiments de type « Cour », un paramètre supplémentaire règle les dimensions de la cour intérieure (facteur de taille de la cour). Les quatre ailes des bâtiments de type « Cour » ont la même profondeur. La profondeur minimale est de 6 mètres et correspond à un facteur de taille de la cour égal à 0. Un facteur de taille de la cour égal à 1 correspond au cas où il n'y a pas de cour. Afin d'étudier l'influence relative de ces paramètres de forme par rapport aux choix relatifs à la définition des éléments fonctionnels, nous avons inclus des paramètres supplémentaires ; les épaisseurs de béton et d'isolant des différents éléments fonctionnels. Les deux ensembles de paramètres (paramètres de forme et paramètres d'éléments fonctionnels) sont résumés dans le Tableau 14. Le calcul des quantités

d'éléments fonctionnels est automatisé à partir du modèle 3D et la base de données des facteurs FEG et FGES est intégrée à l'environnement de modélisation de sorte que les résultats en termes d'EG et d'EC soient obtenus directement dans Grasshopper (ou via un export au format texte). Les résultats sont exprimés respectivement en MJ/m² de plancher/an et kg_{eq}CO₂/m² de plancher/an.

Paramètres d'entrée	Abréviation	Description (unité)
dim_X	s1	Dimension du bâtiment selon l'axe X (m)
dim_Y	s2	Dimension du bâtiment selon l'axe Y (m)
nbr_niveau	s3	Nombre de niveaux
h_niveau	s4	Hauteur des niveaux (m)
h_soubassement	s5	Hauteur du soubassement (m)
tx_vitrage	s6	Taux de vitrage des murs extérieurs (%)
d_structure	s7	Densité de structure : m ³ de structure verticale par m ² de plancher (m ³ /m ²)
d_cloisons	s8	Densité de cloisonnement : mètre linéaire de cloison par m ² de plancher (ml/m ²)
facteur_taille_cour	s9	Facteur variant de 0 à 1 et déterminant la taille de la cour
ep_béton_mur	c1	Epaisseur de béton des murs extérieurs et des murs du sous-sol (m)
ep_iso_mur	c2	Epaisseur d'isolant des murs extérieurs (m)
ep_béton_plancher_inter	c3	Epaisseur de béton des planchers intermédiaires (m)
ep_béton_plancher_bas	c4	Epaisseur de béton du plancher bas (m)
ep_iso_plancher_bas	c5	Epaisseur d'isolant du plancher bas (m)
ep_béton_toit	c6	Epaisseur de béton du toit (m)
ep_iso_toit	c7	Epaisseur d'isolant du toit (m)

Tableau 14 - Les deux jeux de paramètres d'entrée ; les paramètres de forme (haut) et les paramètres d'éléments fonctionnels (bas)

4.2.2.2. Méthode d'analyse de sensibilité

Afin d'étudier le comportement du modèle et l'influence des différents paramètres d'entrée sur l'EG et l'EC, nous avons utilisé deux approches d'analyse de sensibilité (AS) différentes. Notre premier objectif est la caractérisation du modèle : identification des paramètres influents et non influents, considération sur la linéarité du modèle par rapport aux différents paramètres. Notre second objectif consiste à réaliser un classement détaillé des paramètres d'entrée en termes d'influence globale sur la sortie.

Les méthodes d'analyse de sensibilité se divisent en deux grandes catégories, les méthodes locales et les méthodes globales. Les méthodes locales sont basées sur l'évaluation de l'influence de petites perturbations des paramètres d'entrée, autour d'un point nominal. Ces approches déterministes consistent à calculer ou à estimer les dérivées partielles du modèle sur la base d'indices de sensibilité évalués en un point de référence. Les méthodes globales en revanche, s'intéressent à l'ensemble du domaine de variation des paramètres d'entrée. Par conséquent, ces méthodes permettent d'explorer des modèles numériques de manière plus systématique que les méthodes locales. Notre objectif étant l'étude de l'influence relative de différents jeux de paramètres d'entrée, et ce sur l'ensemble des domaines de variation de ces paramètres qui peuvent être considérés comme des espaces de conception, nous nous concentrons sur les méthodes d'AS globales. (Iooss & Lemaître 2015) classent les méthodes d'AS globales en trois catégories principales : les méthodes de criblage (*screening*), les mesures d'importances

(*importance measures*), et les techniques d'exploration de modèle (*deep exploration of sensitivities*). Les méthodes de criblage sont basées sur une discrétisation des entrées en niveaux, permettant une exploration rapide du comportement d'un modèle. Elles sont adaptées à un grand nombre d'entrées. L'objectif de ce type de méthode est double : identifier les paramètres d'entrée non influents et faire des hypothèses réalistes sur la complexité du modèle (linéarités, interactions). Les mesures d'importances sont basées sur une régression linéaire, une régression basée sur le rang ou une décomposition fonctionnelle de la variance (parmi lesquelles le calcul des indices de Sobol (Sobol 1993)). Ces techniques fournissent un classement précis des paramètres d'entrée en fonction de leur influence sur la sortie du modèle. Elles peuvent être utilisées lorsqu'il est possible d'obtenir un échantillon de simulation de grande taille. L'exploration de modèle consiste à rapprocher un modèle numérique par un modèle de substitution (métamodèle pour estimer les indices de Sobol à un coût de calcul inférieur). Au vu de nos objectifs et de la légèreté de notre modèle, qui nous permet de travailler avec de grands échantillons, nous avons sélectionné à la fois une technique de criblage, la méthode Morris et une technique d'exploration de modèle, le calcul des indices de Sobol par métamodèle.

La méthode de Morris (Morris 1991) consiste à discrétiser le domaine de variation de chaque paramètre d'entrée, puis à exécuter un nombre donné de plans d'expérience de type OAT (*One At a Time*), dans lesquels on fait varier un seul paramètre d'entrée à la fois. Cela permet d'estimer les effets élémentaires pour chaque entrée à partir desquels des indices de sensibilité sont calculés; la moyenne de la valeur absolue des effets élémentaires μ_j^* , et l'écart type des effets élémentaires σ_j . μ_j^* est une mesure de l'influence de la $j^{\text{ième}}$ entrée sur la sortie. Le $j^{\text{ième}}$ paramètre d'entrée contribue d'autant plus à la dispersion de la sortie que μ_j^* est grand. σ_j est une mesure de non-linéarité et/ou d'effets d'interaction liés à la de la $j^{\text{ième}}$ entrée. Sur la base d'une représentation graphique de ces indices pour chaque variable d'entrée, la méthode Morris permet de classer les paramètres d'entrée en trois groupes; paramètres d'entrée ayant des effets négligeables, paramètres d'entrée ayant des effets linéaires importants, paramètres d'entrée ayant des effets importants et présentant soit des non-linéarités soit des interactions avec les autres paramètres d'entrée. Dans le plan $(\mu^*; \sigma)$, la distance euclidienne à l'origine est une mesure de l'influence d'un paramètre d'entrée.

Le calcul des indices de Sobol (Sobol 1993) est basé sur la décomposition de la variance. L'indice de Sobol du premier ordre d'une variable d'entrée exprime la part de la variance de la sortie due uniquement à cette variable d'entrée. Son indice de Sobol total exprime la part de la variance de la sortie due à cette variable d'entrée, y compris ses interactions avec les autres variables d'entrée. Les deux méthodes d'AS que nous avons sélectionnées sont mises en œuvre avec la boîte à outils python Aspic (Durand-Estebe et al. 2016). Dans cette boîte à outils, le calcul des indices de Sobol de premier ordre et total provient d'une approche de métamodélisation basée sur la méthode du chaos polynomial. Les résultats de l'AS sont présentés dans la section 4.3 de ce chapitre. L'AS a été effectuée à a fois sur des bâtiments de type « Bloc » et sur des bâtiments de type « Cour », sans niveau de parking souterrain et dans le cas de fondations dimensionnées pour un sol moyen (taux de travail du sol = 200 000 Pa).

La méthode de Morris et le calcul des indices de Sobol nécessitent tous deux la définition des domaines de variation des paramètres d'entrée. Ces domaines de variation, qui peuvent être considérés comme des espaces de conception pour les urbanistes sont résumés dans le Tableau 15. Pour la plupart des paramètres de forme, deux domaines de variation sont proposés. Les domaines de variation étendus ont été définis sur la base de l'analyse de formes urbaines effectuées par (Salat 2011). Ces domaines de variations étendus ont pour objectif de couvrir un large éventail de formes urbaines existantes. Par ailleurs,

les plages de variation sélectionnées pour la densité de structure et la densité de cloisonnement proviennent de la mesure de ces paramètres sur la base des plans de trois bâtiments réels. Les domaines de variation réduits ont quant à eux été définis pour tester la robustesse des résultats en termes d'influence relative de nos deux jeux de paramètres (paramètres de forme et paramètres d'éléments fonctionnels), sachant que la méthode Morris est très sensible au choix des domaines de variation. Les domaines de variation réduits sont destinés à rendre compte de bâtiments aux dimensions relativement classiques pour les bâtiments résidentiels collectifs actuellement construits en France.

Paramètres d'entrée (unité)	Abréviation	Domaine de variation étendu		Domaine de variation réduit	
		Bloc	Cour	Bloc	Cour
dim_X (m)	s1	[10 ; 100]	[20 ; 150]	[40 ; 60]	
dim_Y (m)	s2	[10 ; 100]	[20 ; 150]	[40 ; 60]	
nbr_niveau	s3	[1 ; 15]		[3 ; 8]	
h_niveau (m)	s4	[2.5 ; 4]		[2.7 ; 3.3]	
h_soubassement (m)	s5	[0.5 ; 1.5]		[0.5 ; 1.5]	
tx_vitrage (%)	s6	[0.1 ; 0.4]		[0.2 ; 0.3]	
d_structure (m ³ /m ²)	s7	[0.02 ; 0.06]		[0.04 ; 0.05]	
d_cloisons (ml/m ²)	s8	[0.18 ; 0.24]		[0.18 ; 0.24]	
facteur_taille_cour	s9	<i>NR</i>	[0 ; 0.5]	<i>NR</i>	[0 ; 0.5]
ep_béton_mur (m)	c1		[0.16 ; 0.24]		
ep_iso_mur (m)	c2		[0.12 ; 0.18]		
ep_béton_plancher_inter (m)	c3		[0.16 ; 0.24]		
ep_béton_plancher_bas (m)	c4		[0.2 ; 0.3]		
ep_iso_plancher_bas (m)	c5		[0.12 ; 0.2]		
ep_béton_toit (m)	c6		[0.16 ; 0.24]		
ep_iso_toit (m)	c7		[0.16 ; 0.24]		

Tableau 15 - Domaines de variation des paramètres d'entrée

La méthode Morris a été appliquée pour les deux géométries et pour les domaines de variation étendus et réduits des paramètres d'entrée. Le nombre de répétitions des plans d'expérience OAT est fixé à 100, ce qui conduit à des échantillons de 1600 et 1700 configurations de bâtiment respectivement pour la géométrie de type « Bloc » et la géométrie de type « Cour ».

Le calcul des indices de Sobol est effectué pour les deux géométries sur des échantillons de 1500 configurations de bâtiments dont les valeurs des paramètres d'entrée sont tirées au hasard dans les domaines de variation étendus des paramètres d'entrée, selon une loi de probabilité uniforme pour chaque paramètre.

4.2.2.3. Méthode d'analyse de contribution

Nous avons également effectué une analyse de contribution pour développer une compréhension plus précise de la dépendance de l'EG et de l'EC à la forme des bâtiments. Cette analyse consiste à étudier la contribution de chaque élément fonctionnel à l'EG et à l'EC du bâtiment ainsi que les niveaux de variabilité associés. Cette analyse a été réalisée pour chaque géométrie (« Bloc » et « Cour ») sur les mêmes

échantillons de configuration de bâtiments que ceux utilisés pour le calcul des indices de Sobol. Les paramètres d'éléments fonctionnels (c1 à c7) sont par contre maintenus constants à leur valeur nominale (Tableau 13), et ce afin de ne prendre en compte dans la variabilité liée à chaque élément fonctionnel, que les effets liés à la forme du bâtiment.

De plus, l'EG et l'EC totales de chaque configuration de bâtiment sont comparées à la compacité du bâtiment. Plusieurs mesures de compacité sont souvent utilisées lors de l'analyse de la performance énergétique des bâtiments (liée à l'énergie consommée en phase d'exploitation du bâtiment, telle que les consommations de chauffage, de climatisation ou d'éclairage), qui sont des facteurs morphologiques simples. La plus classique, est la compacité évaluée en fonction du volume du bâtiment (C_V). Elle est calculée comme le rapport entre la surface de l'enveloppe du bâtiment et son volume (eq. 25). C_V peut également être analysée comme le produit d'un facteur de forme adimensionnelle (F_F) (eq. 26) et un d'un facteur de taille (F_T) (eq. 27), ce qui permet de distinguer les bâtiments de même forme et donc de même compacité, mais de tailles différentes. En architecture, il arrive également que la compacité soit définie en fonction de la surface plancher (C_S), elle est alors calculée comme le rapport entre la surface de l'enveloppe et la surface plancher (eq. 28).

$$C_V = S/V \quad \text{eq. 25}$$

$$F_F = S/V^{2/3} \quad \text{eq. 26}$$

$$F_T = 1/V^{1/3} \quad \text{eq. 27}$$

$$C_S = S/S_p \quad \text{eq. 28}$$

Où S est la surface de l'enveloppe, V est le volume du bâtiment, et S_p est la surface plancher.

Enfin, nous avons étudié l'influence des fondations et de l'ajout d'un niveau de parking souterrain. Cette analyse spécifique est présentée en annexe (Annexe 3. Influence de la prise en compte des fondations et des niveaux de parking souterrain).

4.3. RESULTATS ET DISCUSSION

4.3.1. Identification des paramètres influents et analyse du comportement du modèle

L'influence de chaque paramètre sur l'EG et l'EC (analyse Morris) pour les géométries de type « Bloc » et pour les domaines de variation étendus sont présentés sur la Figure 32. Les mêmes résultats sont présentés sur la Figure 33 pour les domaines de variation réduits. Les résultats pour la géométrie de type « Cour » sont présentés sur les Figure 34 et Figure 35. Dans tous les cas, les paramètres s_3 (nombre de niveaux) et s_9 (facteur de taille de la cour) sont beaucoup plus influents que les autres paramètres. Par conséquent, ils ne peuvent pas être visualisés sur les graphiques de Morris (sous peine de les rendre illisibles pour les autres paramètres) et leurs coordonnées sont ajoutées sur les graphiques dans des zones de texte.

Dans notre analyse, les paramètres non influents sont les paramètres pour lesquels la distance euclidienne à l'origine dans le plan (μ^* ; σ) est inférieure à 10% de la distance euclidienne à l'origine du paramètre le plus influent.

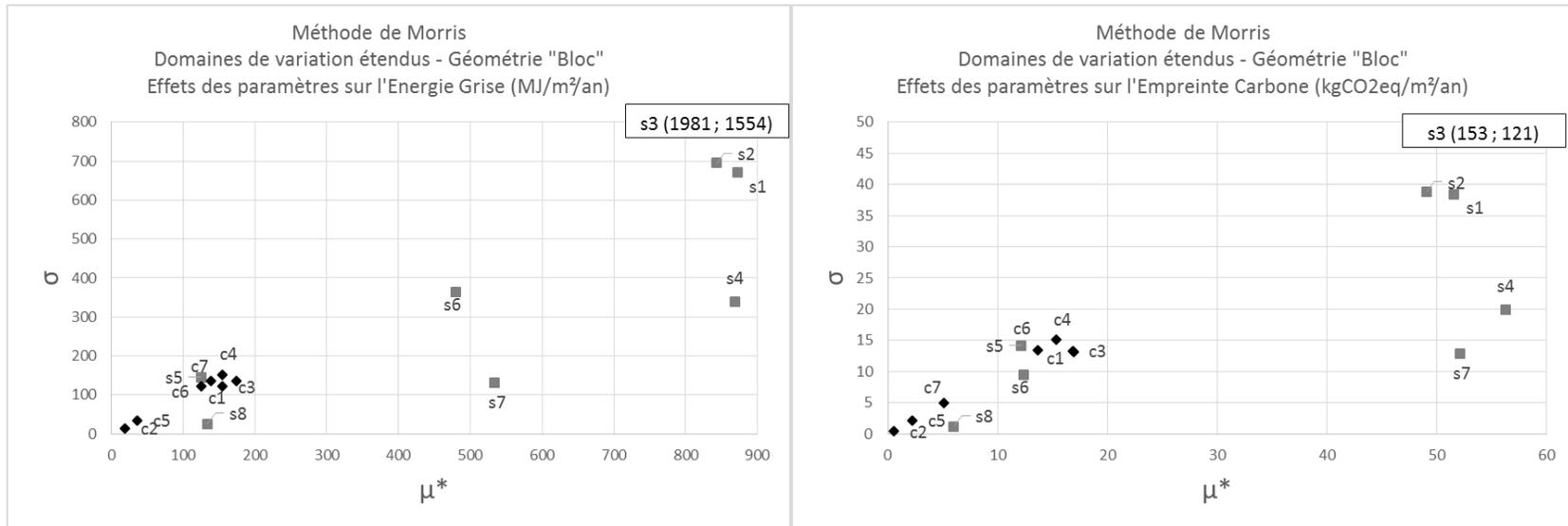


Figure 32 - Résultats de l'analyse de Morris pour la géométrie de type « Bloc » et pour les domaines de variation étendus des paramètres d'entrée ; Energie Grise (gauche) et Empreinte Carbone (droite). Pour chaque paramètre j , μ_j^* est la moyenne de la valeur absolue des effets élémentaires et σ_j est l'écart type des effets élémentaires

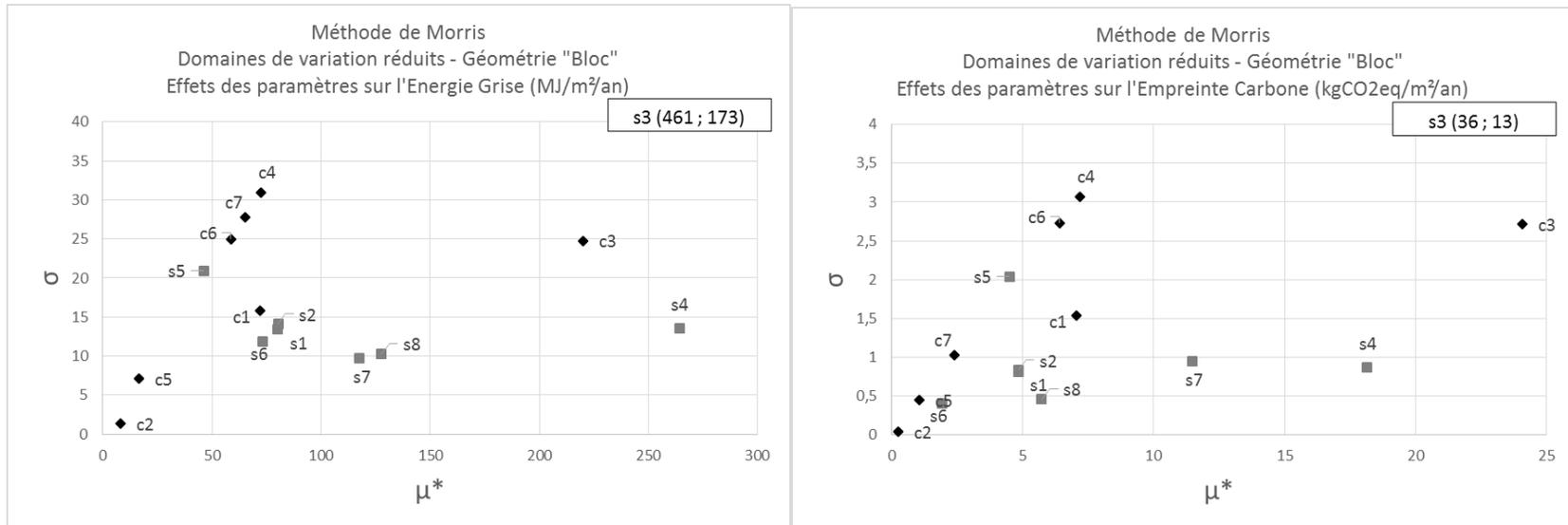


Figure 33 - Résultats de l'analyse de Morris pour la géométrie de type « Bloc » et pour les domaines de variation réduits des paramètres d'entrée ; Energie Grise (gauche) et Empreinte Carbone (droite). Pour chaque paramètre j , μ_j^* est la moyenne de la valeur absolue des effets élémentaires et σ_j est l'écart type des effets élémentaires

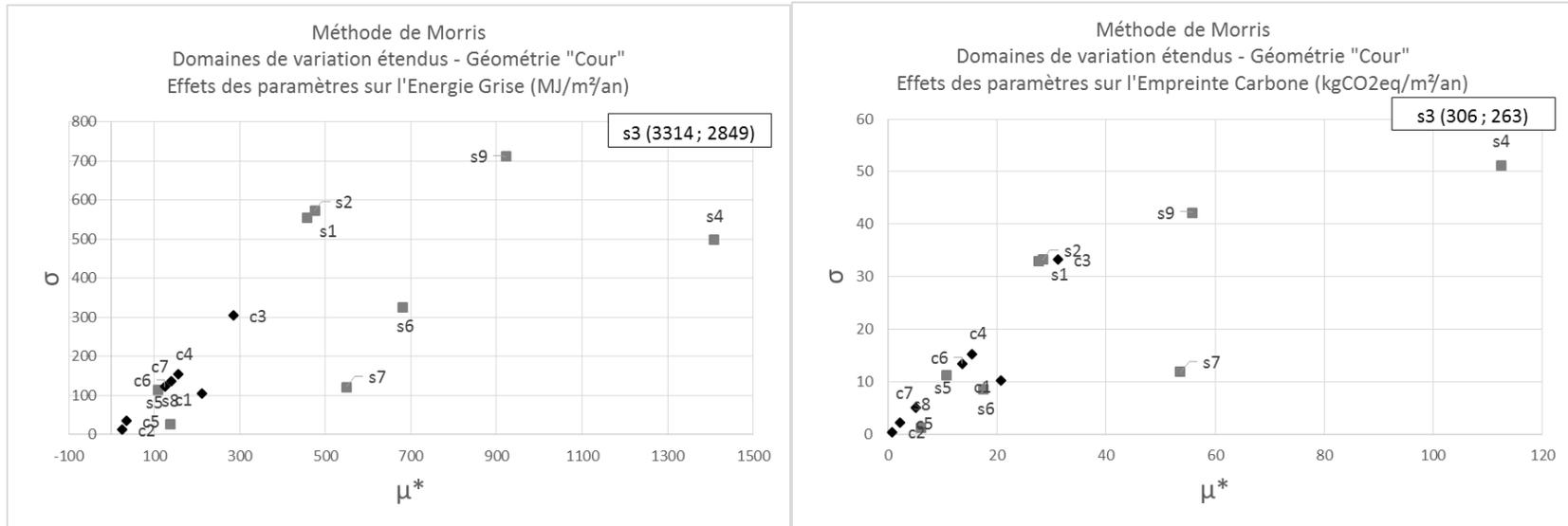


Figure 34 - Résultats de l'analyse de Morris pour la géométrie de type « Cour » et pour les domaines de variation étendus des paramètres d'entrée ; Energie Grise (gauche) et Empreinte Carbone (droite). Pour chaque paramètre j , μ_j^* est la moyenne de la valeur absolue des effets élémentaires et σ_j est l'écart type des effets élémentaires

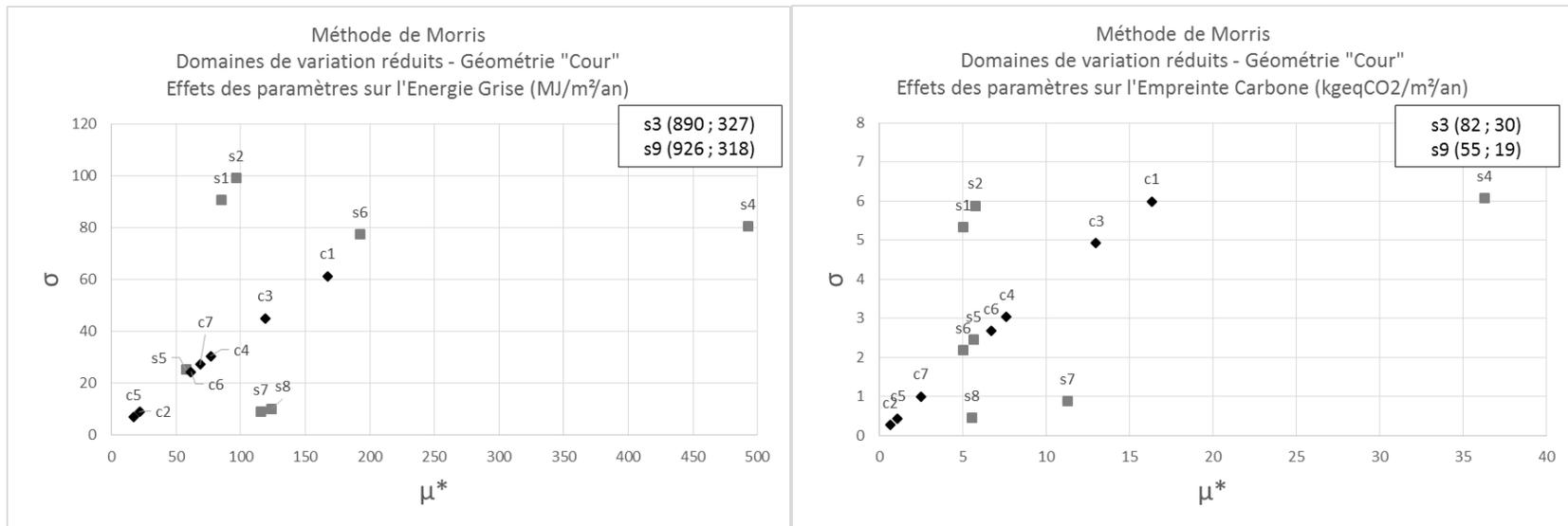


Figure 35 - Résultats de l'analyse de Morris pour la géométrie de type « Cour » et pour les domaines de variation réduits des paramètres d'entrée ; Energie Grise (gauche) et Empreinte Carbone (droite). Pour chaque paramètre j , μ_j^* est la moyenne de la valeur absolue des effets élémentaires et σ_j est l'écart type des effets élémentaires

Le classement des paramètres d'entrée entre paramètres influents et non influents est présenté dans le Tableau 16, et ce pour les deux types de domaines de variation. Lorsque les domaines de variation étendus sont considérés, les résultats en termes d'influence sur l'EG sont identiques pour les deux types de géométries. Tous les paramètres de forme apparaissent comme influents à l'exception de la hauteur du soubassement (s5) et de la densité de cloisonnement (S8). Tous les paramètres d'éléments fonctionnels ont des effets négligeables. En termes d'EC, les résultats sont très similaires à quelques différences près ; le taux de vitrage (s6) a des effets négligeables, l'épaisseur de béton des planchers intermédiaires (c3) est influente pour les deux géométries, et l'épaisseur de béton des murs extérieurs (c1) et du plancher bas (c4) sont influents pour la seule géométrie de type « Bloc ». Ces différences entre les résultats en termes d'EE et d'EC proviennent du rapport FEG/FGES qui est environ 2,5 fois plus élevé pour les fenêtres que pour les murs, les planchers et le toit.

Paramètres influents	Domaine de variation étendu				Domaine de variation réduit			
	Energie Grise		Empreinte Carbone		Energie Grise		Empreinte Carbone	
	Bloc	Cour	Bloc	Cour	Bloc	Cour	Bloc	Cour
dim_X (s1)	X	X	X	X	X	X	X	X
dim_Y (s2)	X	X	X	X	X	X	X	X
nbr_niveau (s3)	X	X	X	X	X	X	X	X
h_niveau (s4)	X	X	X	X	X	X	X	X
h_soubassement (s5)	-	-	-	-	-	-	X	-
tx_vitrage (s6)	X	X	-	-	X	X	-	-
d_structure (s7)	X	X	X	X	X	X	X	X
d_cloisons (s8)	-	-	-	-	X	X	X	-
facteur_taille_cour (s9)		X		X		X		X
ep_béton_mur (c1)	-	-	X	-	X	X	X	X
ep_iso_mur (c2)	-	-	-	-	-	-	-	-
ep_béton_plancher_inter (c3)	-	-	X	X	X	X	X	X
ep_béton_plancher_bas (c4)	-	-	X	-	X	-	X	-
ep_iso_plancher_bas (c5)	-	-	-	-	-	-	-	-
ep_béton_toit (c6)	-	-	-	-	X	-	X	-
ep_iso_toit (c7)	-	-	-	-	X	-	-	-

Tableau 16 – Classement des paramètres influents (X) et non-influents (-) selon l'analyse de Morris

Cette analyse nous montre également que tous les paramètres influents présentent des effets non linéaires, à l'exception de la densité de structure (s7) à laquelle le modèle présente une dépendance linéaire. Ceci s'explique du fait que dans notre modèle, la densité de structure est prise en compte comme un paramètre d'entrée et est exprimé par m² de plancher. Une prochaine étape pourrait consister à intégrer le calcul de la densité de structure dans le modèle pour la rendre dépendante de la forme du bâtiment.

Lorsque l'on considère les domaines de variation réduits, les paramètres de forme restent parmi les paramètres les plus influents, seule la hauteur du soubassement (s5) est non influente sur l'EG et sur l'EC, et le taux de vitrage (s6) est non influent sur l'EC. Par ailleurs, les paramètres liés aux épaisseurs de béton

des murs (c1), du plancher bas (c4) et du toit (c6) apparaissent comme des paramètres influents en plus de l'épaisseur de béton des planchers intermédiaires (c3). Les épaisseurs d'isolant restent non influentes dans tous les cas (à l'exception de la géométrie « Bloc » en termes d'EG).

On constate également que certains paramètres de forme, qui présentaient des effets non-linéaires importants lors de l'examen des domaines de variation étendus, présentent des effets linéaires lorsque l'on considère les domaines de variation réduits. C'est le cas pour le nombre de niveaux (s3), la hauteur de niveau (S4) et la densité de cloisonnement (S8), en plus de la densité de structure (s7).

Les domaines de variation étendus des paramètres d'entrée ont été spécifiés de manière à couvrir un large spectre de formes et de dimensions de bâtiments rendant compte de la diversité des formes urbaines existantes. Les domaines de variations réduits ont été choisis pour représenter des formes et des dimensions usuelles pour les constructions actuelles de bâtiments résidentiels collectifs en France. Dans les deux cas, les paramètres liés à la forme ont plus ou autant d'influence que les paramètres liés à la définition des éléments fonctionnels. Ainsi, la prise en compte de la forme des bâtiments est au moins aussi importante que la prise en compte des épaisseurs de matériaux composants les éléments fonctionnels lorsque l'on compare différents scénarios de bâtiments ou d'aménagement en phase esquisse.

4.3.2. Classement des paramètres d'entrée en fonction de leur degré d'influence

La mise en place de métamodèles pour le calcul des indices de Sobol est effectuée sur les résultats d'EG et d'EC pour un échantillon de 1500 configurations de bâtiments tirées aléatoirement dans les domaines de variation étendus des paramètres d'entrée pour chaque géométrie. Dans cette section, nous présentons d'abord les principales caractéristiques de ces échantillons de simulation, puis le classement des paramètres d'entrée en fonction des indices de Sobol totaux.

Le Tableau 17 montre une analyse statistique de la surface plancher des échantillons et des résultats (EG et EC) pour les deux géométries. Les deux échantillons sont caractérisés par une dispersion très élevée en termes de surface plancher. Pour les deux géométries, environ 80% des bâtiments ont une surface plancher comprise entre 5 000m² et 50 000m². Les résultats en termes d'EG et d'EC présentent également une forte dispersion. Les valeurs moyennes pour les bâtiments de type « Bloc » sont de 2413 MJ/m²/an et 193 kgCO₂eq/m²/an. Lorsque l'on considère les domaines de variation étendus des paramètres d'entrée comme un espace de conception, la variabilité (définie comme deux fois l'écart type divisé par la moyenne) associée à cet espace de conception est de 45% pour l'EG et 41% pour l'EC. Les valeurs moyennes pour les bâtiments de type « Cour » sont de 2655 MJ/m²/an et 197 kgCO₂eq/m²/an. La variabilité associée aux domaines de variation étendus des paramètres d'entrée est de 77% pour l'EG et 90% pour l'EC. Les variabilités pour les deux types de géométries ne peuvent pas être directement comparées, car les domaines de variation des paramètres d'entrée sont différents. Néanmoins, la géométrie de type « Cour » semble encore plus sensible aux paramètres liés à la forme que la géométrie de type « Bloc ».

	Echantillon de configurations de type "Bloc"			Echantillon de configurations de type "Cour"		
	Surface plancher m ²	EG MJ/m ² /an	EC kgCO ₂ eq/m ² /an	Surface Plancher m ²	EG MJ/m ² /an	EC kgCO ₂ eq/m ² /an
moyenne	25040	2413	193	29975	2655	197
médiane	17130	2305	186	20951	2435	173
écart-type	23317	542	40	27694	1024	89
minimum	438	1486	122	988	1067	79

maximum	130146	4995	403	175098	8060	689
---------	--------	------	-----	--------	------	-----

Tableau 17 – Analyse statistique des échantillons de configurations de bâtiments de type « Bloc » et « Cour »

La Figure 36 et la Figure 37 présentent respectivement pour les géométries « Bloc » et « Cour » les indices de Sobol totaux pour l’EG et l’EC. Dans tous les cas, les paramètres les plus influents sont ceux liés au gabarit du bâtiment; nombre de niveaux, hauteur de niveau, et emprise au sol du bâtiment (dim_X, dim_Y et facteur_taille_cour). Ces paramètres expliquent 88% et 90% de la variance de l’EG sur notre espace de conception, respectivement pour les géométries « Bloc » et « Cour ». L’ajout de la densité de structure et du taux de vitrage permet de rendre compte de 95% de la variance du modèle pour les deux géométries. Pour les deux types de géométries, le nombre de niveau est de loin le paramètre le plus influent. Il explique 54% de la variance de l’EG pour la géométrie « Bloc » et 65% pour la géométrie « Cour ».

En termes d’EC, les résultats sont similaires, à l’exception de la densité de structure qui est relativement plus influente que pour l’EG, et du taux de vitrage qui a très peu d’influence. En effet, le rapport FEG/FGES est plus élevé pour les fenêtres que pour la structure. Là encore, le nombre de niveaux explique 59% de la variance de l’EC pour la géométrie « Bloc », et 76% pour la géométrie de la « Cour ».

Ce classement des paramètres d’entrée en fonction de leur contribution quantitative à la variance de la sortie montre à nouveau que les paramètres liés à la forme du bâtiment sont importants à considérer lors de l’évaluation des niveaux d’EG et d’EC au stade du plan masse. C’est particulièrement important au vu de la très grande variance du modèle sur l’espace de conception. Ce classement indique également que la hauteur du bâtiment est un facteur clé de l’influence de la forme du bâtiment sur son énergie grise (et son empreinte carbone) conformément à la revue de la littérature. Néanmoins, il met également en évidence un degré de complexité plus élevé avec d’autres paramètres de forme ayant des effets important sur les niveaux d’EG et d’EC.

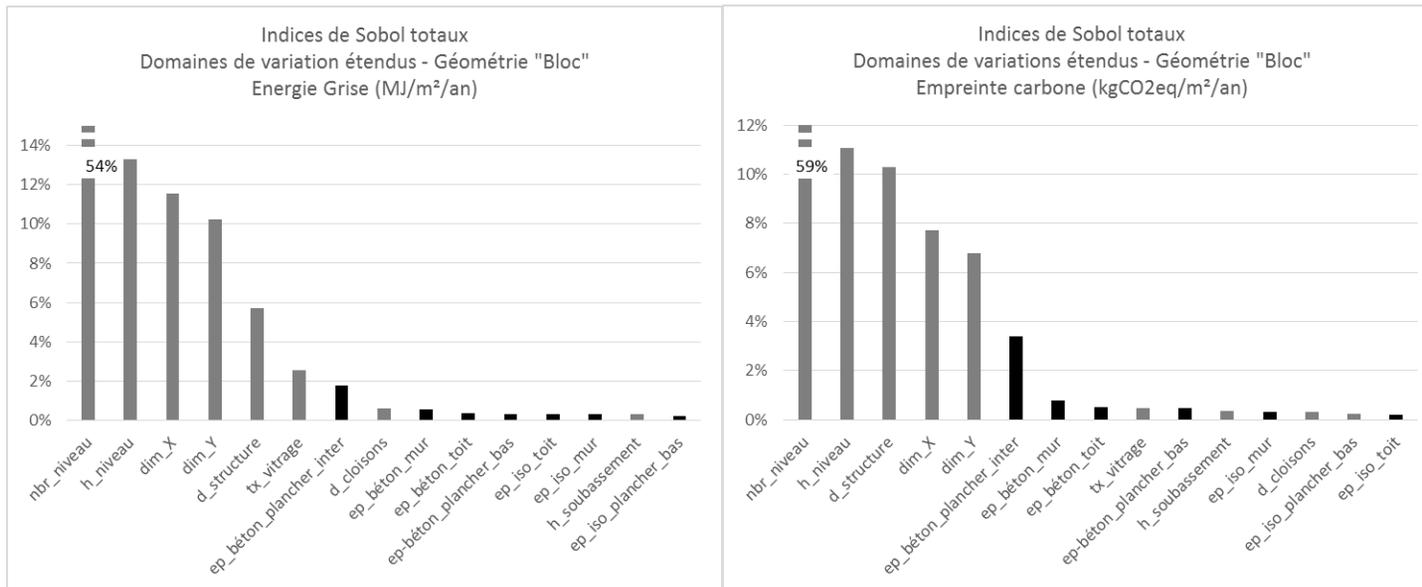


Figure 36 – Indice de Sobol totaux pour la géométrie « Bloc » (domaines de variations étendus)

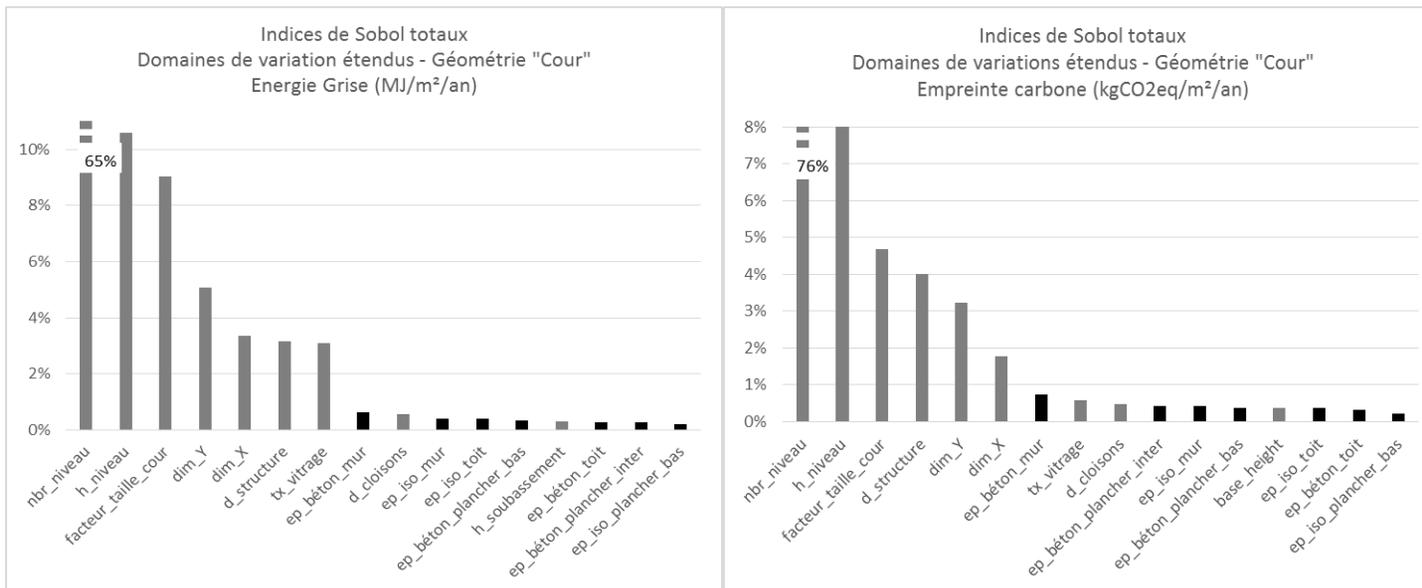


Figure 37 - Indice de Sobol totaux pour la géométrie « Cour » (domaines de variations étendus)

4.3.3. Analyse de contribution

Les résultats d'analyse de sensibilité ont permis de mettre en évidence l'influence de la forme d'un bâtiment sur son énergie grise et son empreinte carbone. Afin de mieux comprendre l'influence relative de chaque élément fonctionnel, nous présentons ici les résultats de l'analyse de contribution. Cette analyse consiste à déterminer la contribution (et la variabilité associée) de chaque élément fonctionnel à l'EG et EC du bâtiment. Pour cette analyse, les échantillons de simulation utilisés pour le calcul des indices de Sobol ont été modifiés pour conserver constants les paramètres liés à la définition des éléments fonctionnels (c1 à c7). La moyenne, le premier et le troisième quartile, ainsi que les valeurs maximales et minimales de l'EG et de l'EC sont présentées Figure 38 et Figure 39 pour la géométrie « Bloc », et Figure 40 et Figure 41 pour la géométrie « Cour ».

Les planchers intermédiaires, les cloisons et la structure sont les trois principaux contributeurs à l'EG. En moyenne, ces trois éléments fonctionnels représentent 60% de l'énergie grise du bâtiment. Les planchers intermédiaires et la structure sont les deux principaux contributeurs à l'EC. En moyenne ils représentent 55% de l'empreinte carbone des bâtiments. Cela souligne encore une fois l'importance de la contribution des éléments en béton à l'EC. Pour les deux géométries, seules les fondations (semelles et soubassement) ont une contribution limitée à l'EG et à l'EC (contribution inférieure à 5%). Les contributions des autres éléments fonctionnels sont de l'ordre de 5% à 10%. On note également que les contributions de certains éléments fonctionnels, à savoir les planchers intermédiaires et les cloisons, présentent une variabilité limitée, alors que les contributions de la structure, des fenêtres, des murs extérieurs, du toit et du plancher bas présentent une grande variabilité.

Nous exprimons nos résultats par m^2 de surface plancher et par an ($/m^2/an$). Ainsi les impacts relatifs à chaque élément fonctionnel sont distribués sur la somme des surfaces de plancher intermédiaires et de plancher bas. Les impacts associés aux planchers intermédiaires sont par conséquent relativement constants (variabilité limitée) au sein de notre échantillon (puisque dans la plupart des configurations les surfaces de planchers intermédiaires sont bien plus importantes que la surface de plancher bas). A l'opposé, les variabilités associées aux vitrages, aux murs extérieurs, au plancher bas ou au toit sont élevées du fait qu'au sein de notre échantillon, les rapports des surfaces de ces éléments fonctionnels sur la surface plancher varient beaucoup. Ces variations dans les proportions relatives des éléments fonctionnels par m^2 de plancher sont directement liées à la forme du bâtiment et en particulier à sa compacité telle que définie dans la section 4.2.2.3.

Pour les autres éléments fonctionnels, les niveaux de variabilité proviennent du choix des domaines de variation des paramètres d'entrée. Dans le cas des cloisons, la faible variabilité provient du domaine de variation relativement limité du paramètre s8 (densité de cloisonnement). Dans le cas de la structure, la forte variabilité est due au large domaine de variation spécifié pour le paramètre s7 (densité de la structure).

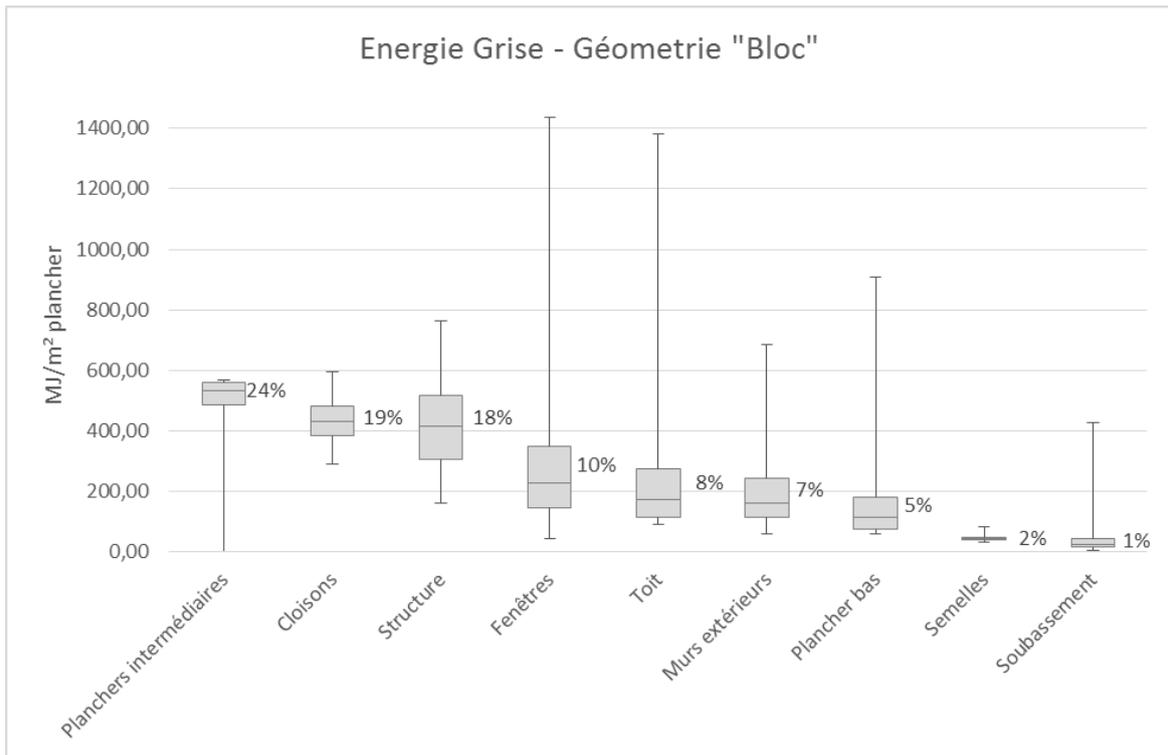


Figure 38 – Analyse de contribution des éléments fonctionnels pour l'énergie grise – géométrie « Bloc »

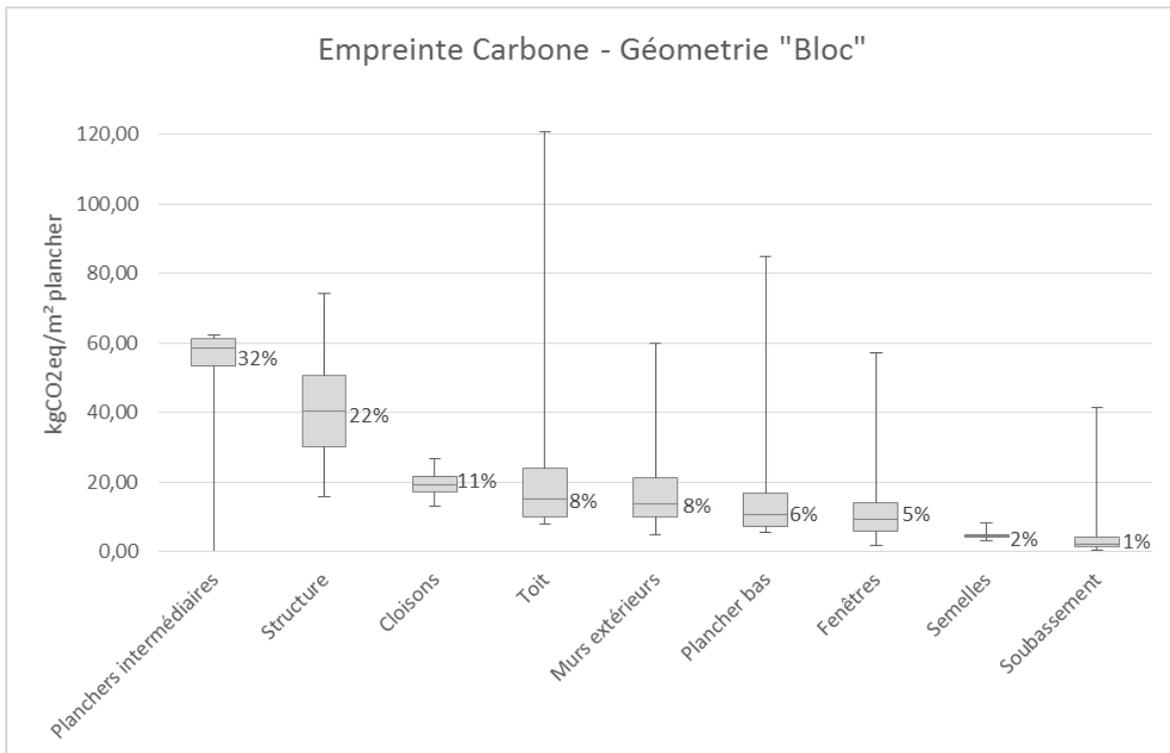


Figure 39 - Analyse de contribution des éléments fonctionnels pour l'empreinte carbone – géométrie « Bloc »

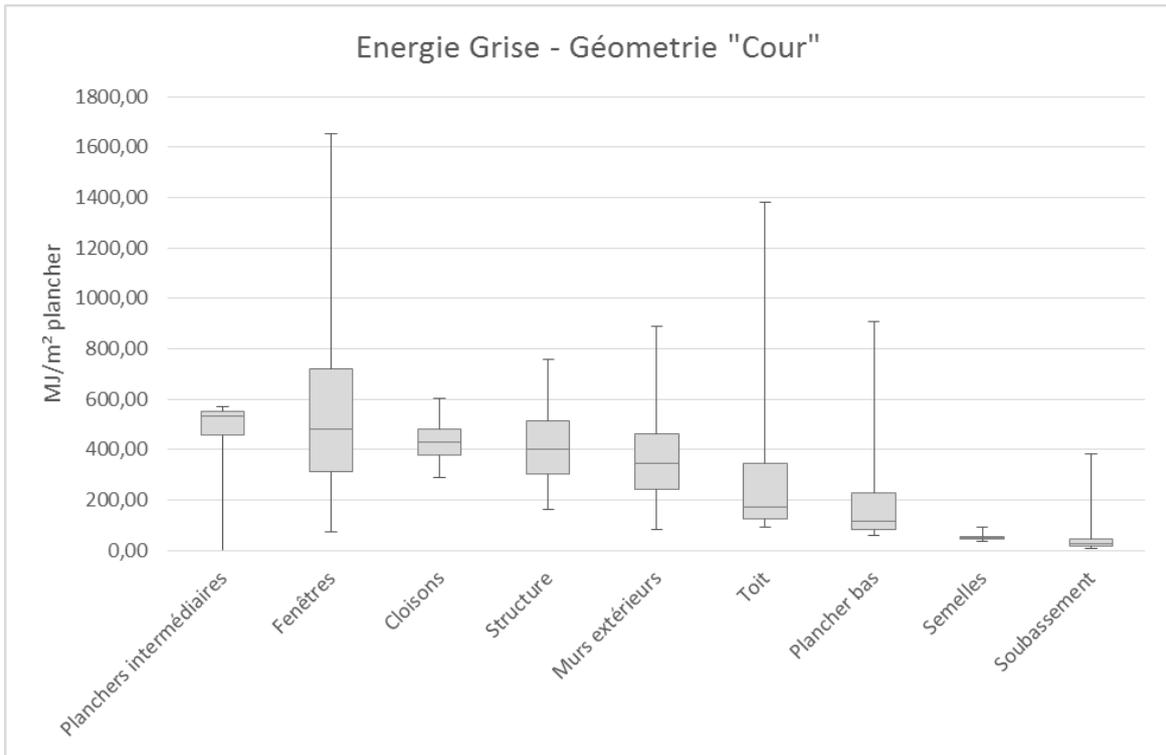


Figure 40 - Analyse de contribution des éléments fonctionnels pour l'énergie grise – géométrie « Cour »

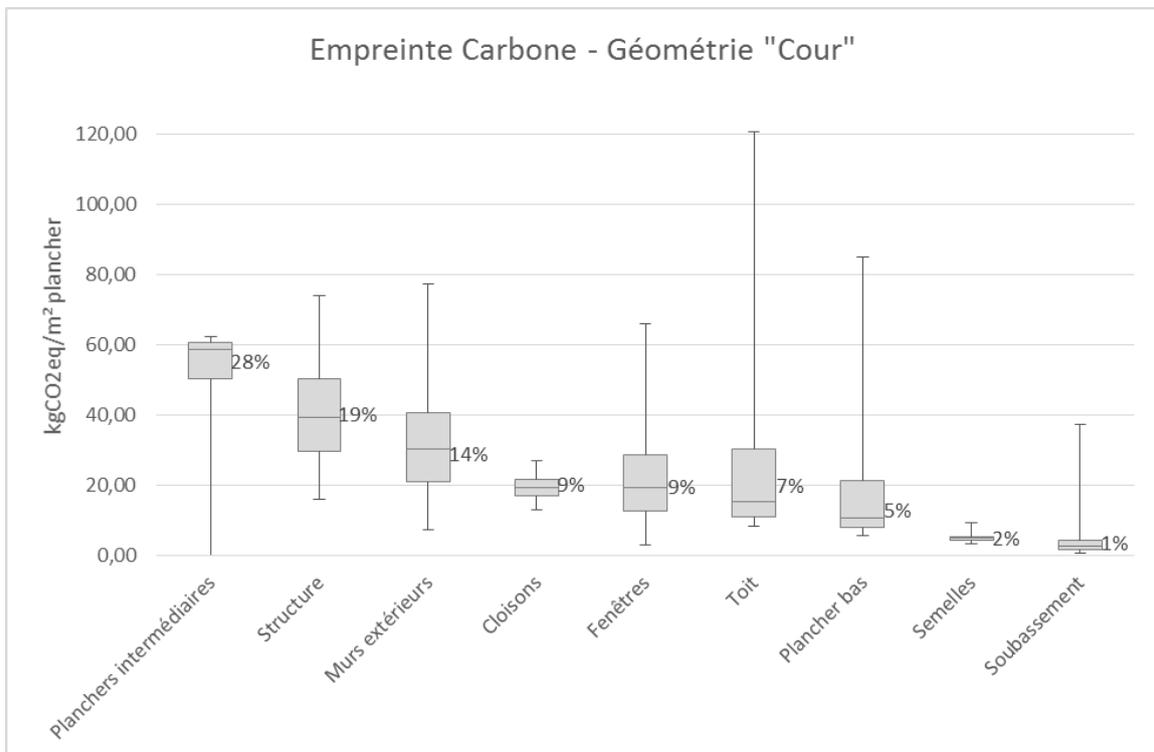


Figure 41 - Analyse de contribution des éléments fonctionnels pour l'empreinte carbone – géométrie « Cour »

Dans l'analyse de sensibilité, la hauteur du bâtiment (au travers du nombre de niveaux) est apparue comme un paramètre clé conditionnant assez largement l'EG et l'EC. L'analyse de contribution, et plus

particulièrement l'analyse des variabilités associées aux contributions de chaque élément fonctionnel a permis de mettre en évidence le rôle de la compacité du bâtiment.

Pour les deux types de géométries, les 1500 configurations de bâtiments ont été représentées dans des graphes (compacité ; EG) et (compacité ; EC), et ce pour les quatre mesures de compacité définies dans la section 4.2.2.3. La mesure de compacité $C_S = S/S_p$ est celle qui présente les meilleures corrélations avec l'EG et l'EC. En effet l'EG (Figure 42) et l'EC (Figure 43) pour la géométrie « Bloc » présentent des dépendances linéaires à C_S avec des coefficients de détermination respectifs $R^2 = 0,82$ et $R^2 = 0,80$. Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) associées sont respectivement de 228 MJ/m²/an et 18 kg_{eq}CO₂/m²/an (soit environ 10% des valeurs moyennes de l'EG et de l'EC). La Figure 44 et la Figure 45 présentent ces mêmes résultats pour la géométrie de type « Cour ». L'EG et l'EC présentent également une dépendance linéaire à C_S avec des coefficients de détermination $R^2 = 0,92$ et $R^2 = 0,89$. Les RMSE associées sont respectivement de 295 MJ/m²/an et 29 kg_{eq}CO₂/m²/an (soit environ 10% et 15% des valeurs moyennes d'EG et d'EC). Pour la géométrie « Bloc », seuls 2% et 3% des cas présentent une erreur relative supérieure à 20% pour l'EG et l'EC. Pour la géométrie « Cour », 8% et 18% des cas présentent une erreur relative supérieure à 20% respectivement pour l'EG et l'EC. Il est également intéressant de noter que les coefficients de régression linéaire dépendent fortement du type de géométrie. Ces résultats permettent d'envisager l'utilisation de C_S comme un proxy pour l'évaluation des niveaux d'EG et d'EC des bâtiments de type « Bloc ». Ils montrent également que pour des géométries plus complexes, le modèle basé sur la décomposition en éléments fonctionnels est nécessaire.

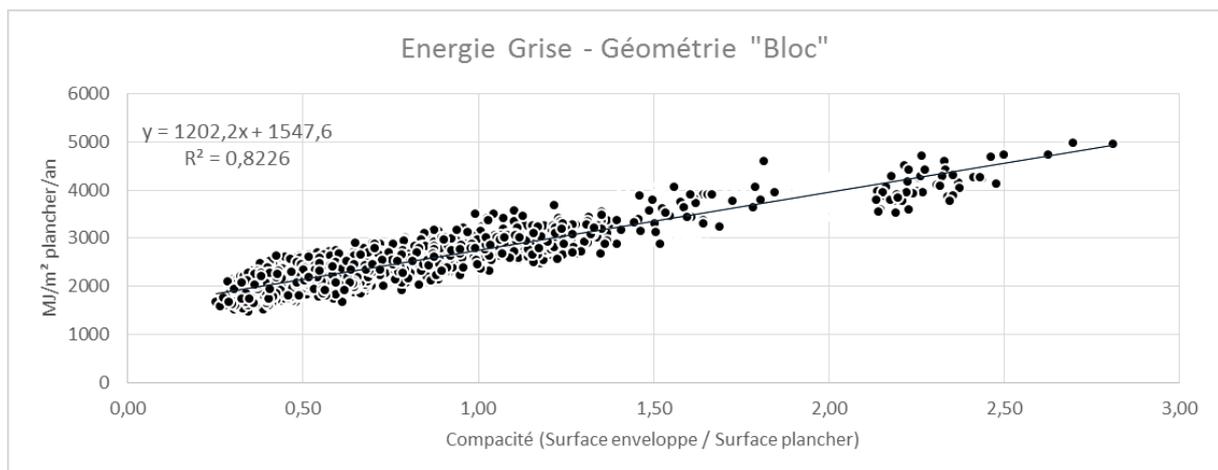


Figure 42 – Géométrie « Bloc » ; régression linéaire de l'énergie grise par rapport à la compacité

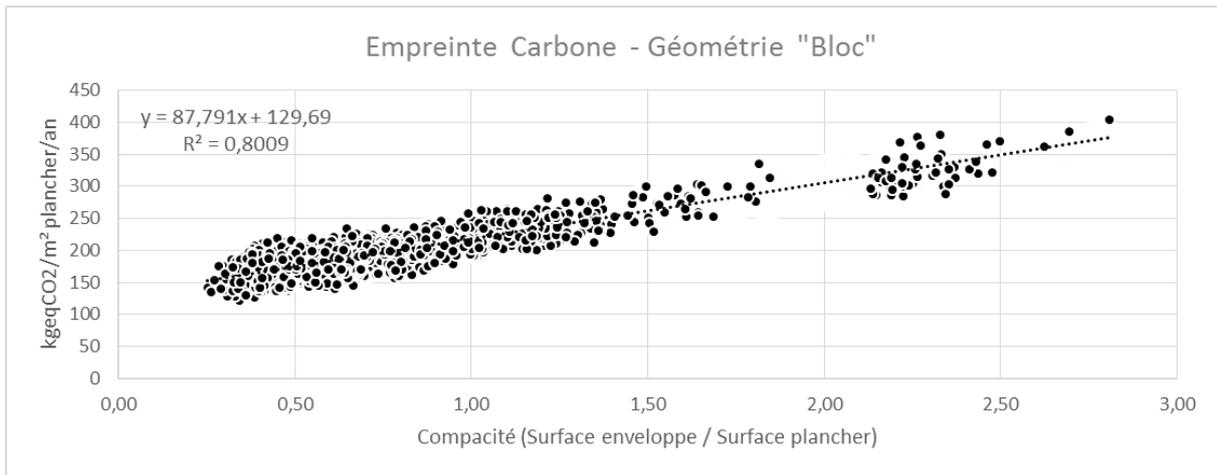


Figure 43 - Géométrie « Bloc » ; régression linéaire de l’empreinte carbone par rapport à la compacité

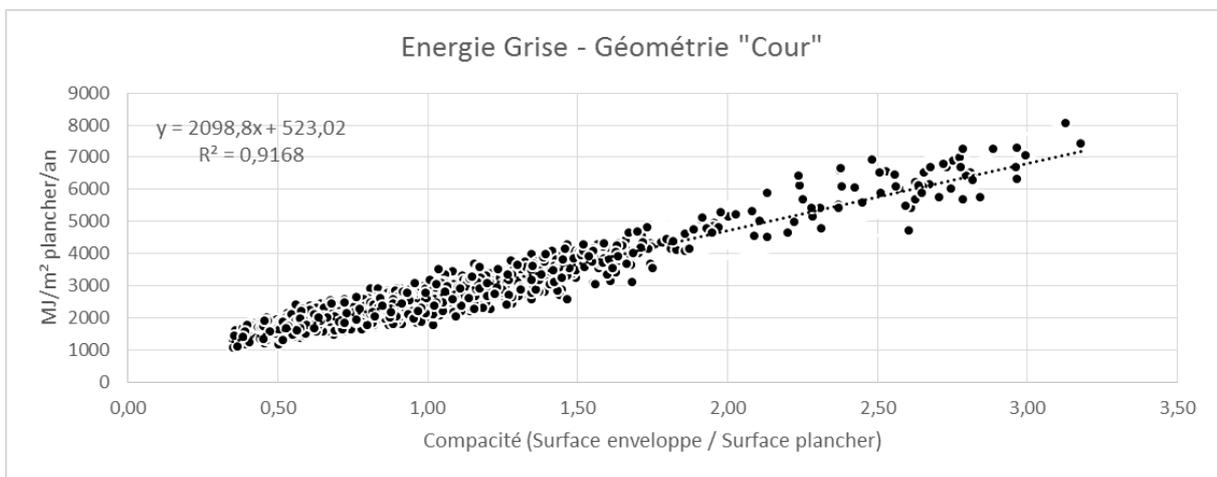


Figure 44 - Géométrie « Cour » ; régression linéaire de l’énergie grise par rapport à la compacité

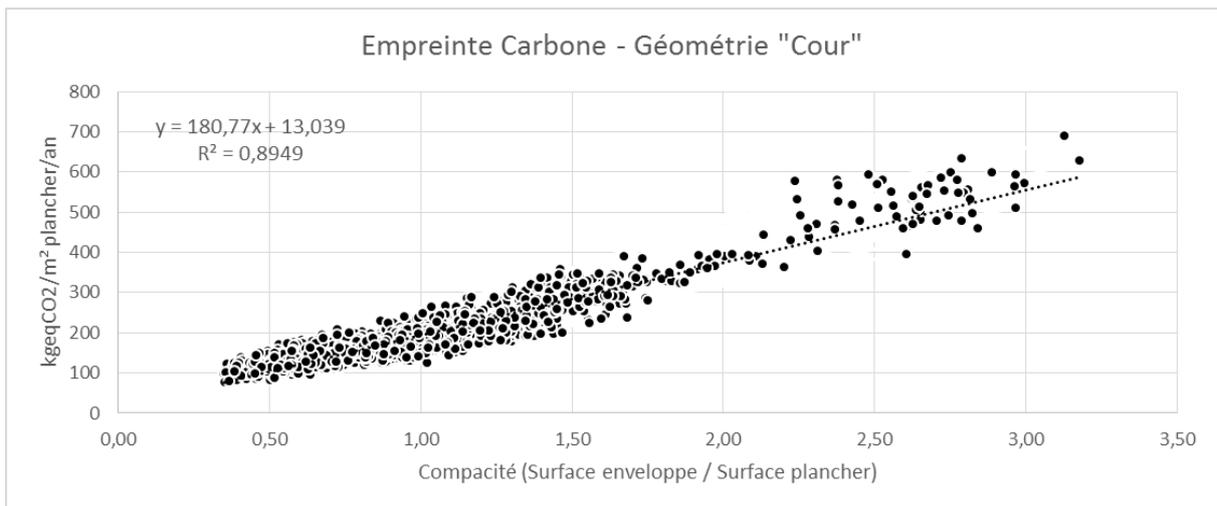


Figure 45 - Géométrie « Cour » ; régression linéaire de l’empreinte carbone par rapport à la compacité

4.4. CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons proposé une approche de modélisation simplifiée pour l'évaluation de l'énergie grise et de l'empreinte carbone des bâtiments. Cette approche a été développée pour servir d'outil d'aide à la décision en phase amont d'un projet d'aménagement. Elle est adaptée à la phase d'établissement du plan masse tant en termes de disponibilité des données, que de temps de mise en œuvre et de coût de calcul. Le modèle proposé est sensible à la forme générale des bâtiments (gabarits), qui constitue l'un des leviers majeurs par lequel le concepteur urbain peut agir sur les potentiels énergétiques de l'aménagement qu'il est en train de préfigurer.

La mise en œuvre du modèle dans un environnement de modélisation 3D paramétrique et pour deux types de formes génériques de bâtiments nous a permis d'étudier en détail l'influence des paramètres liés à la forme d'un bâtiment sur son énergie grise et son empreinte carbone. Nous avons en particulier étudié l'influence relative de ces paramètres de forme par rapport à des paramètres relevant de la définition des éléments fonctionnels composant le bâtiment (épaisseurs de béton et épaisseurs d'isolant). Nous avons montré que les paramètres de forme sont les plus influents, soulignant ainsi la pertinence de notre approche. Peu de publications ont étudié directement les liens entre la forme des bâtiments et leur énergie grise (ou empreinte carbone) (Treloar et al. 2001; Aye et al. 1999; Foraboschi et al. 2014; Waldron et al. 2013). Nous avons exposé dans ce chapitre une analyse détaillée de ces liens, réactivant ainsi ce champ de recherche. Entre autre une relation forte entre la compacité des bâtiments et leurs niveaux d'EG et d'EC a été soulignée. Ce lien pourrait ouvrir la voie à la production de données d'Inventaire de Cycle de Vie paramétrées pour les matériaux de construction des bâtiments, sur la base d'indicateurs morphologiques simples. Ce lien avec la compacité doit également être mis en perspective avec les nombreux essais visant à évaluer les performances énergétiques des bâtiments en phase d'exploitation (chauffage, refroidissement, éclairage) en fonction d'indicateurs de compacité.

Bien que nous prévoyions que nos résultats généraux sur l'influence de la forme des bâtiments sur l'EG et l'EC aient une portée plus large, nous tenons à souligner le fait que l'étude que nous avons présentée a été réalisée uniquement pour des bâtiments de logements collectifs en béton et dans le contexte français. Les résultats détaillés ne peuvent donc pas être utilisés en tant que tels dans d'autres contextes (autres pays et/ou autres systèmes constructifs). Une prochaine étape consisterait à étudier l'influence du choix du système constructif, ainsi que de l'utilisation des données environnementales françaises sur les résultats. Cela permettrait notamment l'étude des niveaux d'incertitude associés à la phase d'établissement du plan masse d'un projet d'aménagement, stade auquel les systèmes constructifs des bâtiments ne sont pas encore arrêtés. Une autre étape supplémentaire consisterait à ajouter plus de catégories d'impact afin de pouvoir étudier les potentiels *trade-offs* liés à la forme des bâtiments entre ces catégories d'impact.

Ces développements s'inscrivent dans la tendance générale de l'application de l'ACV à l'évaluation de l'environnement bâti à l'échelle du quartier. Ils proposent une approche alternative pour la production des données d'inventaire des bâtiments pour servir ces évaluations impliquant un grand nombre de bâtiments. Dans ce contexte, l'énergie grise et l'empreinte carbone ne représentent qu'une partie des impacts relatifs à la thématique énergie, et ce sur la seule phase de construction du cycle de vie des bâtiments. Afin d'enrichir l'analyse sur la phase d'exploitation des bâtiments, nous proposons dans les chapitres suivants (Chapitre 5 et Chapitre 6), une étude de la dépendance des potentiels bioclimatiques d'un quartier à la morphologie urbaine, ainsi qu'une approche d'évaluation simplifiée des besoins annuels de chauffage et de refroidissement à l'échelle du quartier.

L'analyse de l'environnement bâti à l'échelle du quartier doit également inclure d'autres contributeurs que les seuls bâtiments, et notamment les espaces extérieurs (routes, espaces verts, etc.), les réseaux et la mobilité. Nos développements s'inscrivent dans un projet plus vaste, dans lequel ces autres contributeurs sont déjà pris en compte (et cette prise en compte est déjà sensible à la morphologie urbaine). Ce projet vise à améliorer l'outil NEST présenté au Chapitre 3. La stratégie d'intégration à NEST des développements présentés dans ce chapitre sera évoquée au Chapitre 7.

Chapitre 5. Analyse détaillée de l'influence de la morphologie urbaine sur les potentiels bioclimatiques d'un quartier

Le chapitre 4 étudie l'influence de la forme urbaine sur l'énergie grise et l'empreinte carbone liées aux matériaux de construction et leur mise en œuvre dans le bâtiment, et couvre ainsi les étapes de construction (extraction des matières premières et production des matériaux de construction) et de fin de vie du bâtiment.

Les deux chapitres suivants étudient et proposent des modèles pour l'influence de la forme urbaine sur l'étape d'exploitation (usage) du bâtiment.

5.1. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objet l'étude de l'influence de la forme urbaine sur les potentiels bioclimatiques d'un quartier. Plus précisément, nous souhaitons répondre aux questions suivantes :

- Quelle est l'influence relative des différentes sollicitations climatiques sur les potentiels bioclimatiques d'un quartier ?
- Quelle est l'influence relative de différents leviers de conception, au stade du projet d'aménagement, sur ces sollicitations climatiques et donc sur les potentiels bioclimatiques d'un quartier ?

Notre état de l'art (Chapitre 3) nous a donné des éléments de réponse. Cependant les résultats de la littérature sont toujours très dépendants des cas d'étude et des climats auxquels ils se réfèrent. De plus, peu d'études se sont attachées à distinguer les influences relatives de la forme urbaine, de la végétation et de l'albédo des différents types de surfaces. Afin de répondre plus en détail à ces questions, nous proposons ici une analyse fine du bilan thermo-radiatif des surfaces urbaines pour deux cas d'étude que nous avons considérés représentatifs des deux grands types d'opérations d'aménagement dans le contexte français : une opération de rénovation urbaine d'un grand ensemble, et un écoquartier dense. Nous nous concentrons sur ces deux types d'opérations car elles induisent des périmètres de projet à l'échelle du quartier et permettent donc de mobiliser tout ou partie des leviers de conception propres à cette échelle, c'est-à-dire relatifs à la forme urbaine (trame viaire, découpage des parcelles, gabarits des bâtiments), et relatifs aux choix des types de surfaces (aménagement des espaces publics, préconisations quant à la végétalisation des bâtiments).

Dans cette étude nous proposons d'analyser plusieurs scénarios (variations sur la forme et sur les types de surfaces) pour les deux cas d'étude sélectionnés, et ce pour les journées du solstice d'hiver et du solstice d'été. Nous nous concentrons sur le bilan thermo-radiatif de ces quartiers que nous simulons grâce au logiciel SOLENE-microclimat (Bouyer et al. 2011), dont nous avons détaillé le principe au Chapitre 3. Nous utilisons ici SOLENE-microclimat en mode non couplé (pas de couplage avec un logiciel de CFD), c'est-à-dire que nous mobilisons uniquement le moteur de calcul thermo-radiatif et les modèles thermiques de parois.

Dans une première partie, nous présentons nos deux cas d'études ainsi que notre campagne de simulation. Dans une seconde partie nous présentons nos résultats et procédons à leur analyse détaillée en trois temps ; 1. ordres de grandeur des différents termes du bilan énergétique d'une surface urbaine, 2. effets de la forme urbaine et des types de surfaces sur les termes du bilan, et 3. effets de la forme urbaine et des types de surface sur les potentiels bioclimatiques d'un quartier.

5.2. CAS D'ETUDE ET CAMPAGNE DE SIMULATION

5.2.1. Présentation des cas d'étude

5.2.1.1. Rénovation urbaine de type grand ensemble - ZAC Armstrong, Vénissieux

La zone d'aménagement concerté (ZAC) Armstrong est l'une des deux ZACs qui composent l'opération de renouvellement urbain (Programme National de Renouvellement urbain, ANRU) du plateau des Minguettes à Vénissieux (Figure 46). L'opération Armstrong a été lancée en 2005. Entre 2005 et 2007, 400 logements répartis dans trois grandes tours au cœur du quartier ont été détruits pour libérer l'espace central (Figure 47). Les barres d'immeubles périphériques ont été réhabilitées à l'exception d'une section qui a été démolie pour permettre la création d'un mail piétonnier qui traverse le quartier et qui a été inauguré en 2013. Enfin plusieurs programmes immobiliers (300 logements) sont en développement de part et d'autre du mail, qui aboutiront à la reformation d'îlots ouverts de dimensions plus modestes. Le quartier est orienté selon la direction 41°N (axe du mail piétonnier).

Initialement, le quartier Armstrong comptait 684 logements sociaux répartis sur 6,3 hectares (Figure 47, gauche). Il était composé d'une barre de 200m de long et de 5 étages, de 3 tours de 14 étages, de 4 bâtiments de 4 et 5 étages. La surface plancher totale était de 85200m², la hauteur moyenne du quartier (ratio du volume total des bâtiments sur l'emprise au sol des bâtiments) était de 25,4m, le CES était de 14% et le COS de 134%.

Le quartier final comportera approximativement 590 logements (locatif social, accession social et accession libre). Les nouveaux bâtiments construits au cœur du quartier, de part et d'autre du mail piétonnier vont de R+1 à R+6. La surface plancher totale est de 63600m², la hauteur moyenne du quartier est de 15,6m, le CES est de 17% et le COS de 100%. Par la suite, notre étude porte sur cet état final du quartier (Figure 48).

La restructuration urbaine du secteur Armstrong s'effectue sous maîtrise d'ouvrage du Grand Lyon. Le projet d'aménagement (Figure 48) a été réalisé par l'urbaniste Antoine Grumbach.

Nous avons sélectionné ce quartier comme un exemple des projets de rénovation urbaine de type ANRU (Agence Nationale pour le Rénovation Urbaine).



Figure 46 - Opération de renouvellement urbain du plateau des Minguettes, Vénissieux

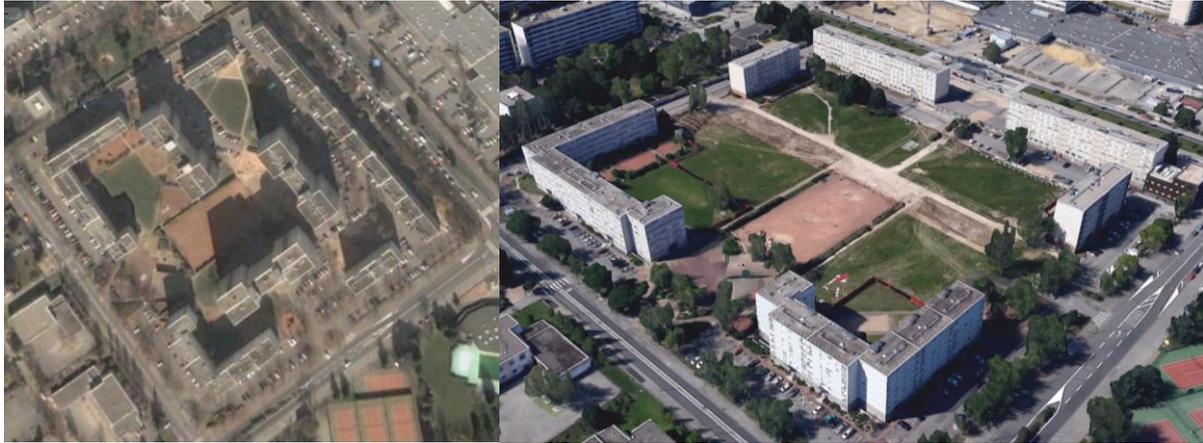


Figure 47 - Quartier Armstrong état initial (gauche) et après démolitions (droite)



Figure 48 - Projet d'aménagement de la ZAC Armstrong

5.2.1.2. Développement neuf type écoquartier dense - ZAC de la Berge du Lac/GINKO, Bordeaux

En 2005, la Communauté Urbaine de Bordeaux a lancé une consultation en vue de l'aménagement du site des Berges du Lac. En février 2006, Bouygues Immobilier, associé aux bailleurs sociaux Aquitanis et Mésolia habitat, est désigné lauréat du projet d'aménagement public " la ZAC de la berge du lac ". L'équipe associe Christian Devillers & associés, l'Agence Brochet-Lajus-Pueyo et le paysagiste Signes pour élaborer le projet d'écoquartier Ginko. Les travaux ont démarré en 2010 pour une clôture du projet en 2020. Le projet s'étend sur une superficie de 32ha et comporte la production de 2700 logements, 19660m² de bureaux et 22000m² de commerces, pour un total de 7000 habitants. 4,5ha de parcs sont également produits. En décembre 2014, Ginko reçoit la labellisation EcoQuartier du ministère du logement.

La ZAC est aménagée par îlots avec l'idée de développer une architecture à la fois cohérente dans son ensemble, mais aussi variée bâtiment par bâtiment. Composé d'une trentaine d'îlots (Figure 49), le quartier Ginko permet de proposer une diversité dans la conception de bâtiments (immeubles collectifs en R+3 à R+9, maisons de ville, du T2 au T5 et plus) et dans l'offre de logements (33% de logements sociaux, 22% d'accession sociale et modérée, 45% d'accession libre...) susceptible d'attirer de nouveaux habitants aux profils variés, vecteur de mixité sociale.

Compte tenu de l'ampleur de ce quartier, nous avons décidé de sélectionner un îlot pour la suite de notre étude. Nous nous concentrons donc par la suite sur l'îlot A2.2 (Figure 50) qui est représentatif des six grands îlots du quart Nord-Ouest du projet. Les plans masse de ces 6 îlots sont en effet similaires avec :

- une orientation 15 °N

- au sud, une rangée de bâtiments bas, en R+1, R+2 (voir R+3)
- derrière cette rangée de bâtiments, une allée piétonne
- le reste de l'îlot est composé d'une dalle sur un niveau
- des bâtiments se développent à partir des quatre coins de cette dalle, avec une gradation des hauteurs, passant de R+3 à R+9 en partant du Sud-Ouest et en allant vers le Nord-Est.

L'îlot A2.2 a une superficie de 0,85ha, la surface plancher total est de 13450m², la hauteur moyenne du quartier est de 15,3m, le CES est de 36% et le COS de 159%.

Nous avons sélectionné ce quartier comme un exemple de développement urbain neuf de type écoquartier dense.



Figure 49 - Plan masse du projet Ginko, Bordeaux



Figure 50 - Projet immobilier développé sur l'îlot A2.2 par Mésolia (Entreprise Sociale pour l'Habitat)⁵

5.2.2. Campagne de simulation

L'objectif de l'étude présentée dans ce chapitre est d'évaluer l'influence des leviers de conception du projet d'aménagement sur les potentiels bioclimatiques à l'échelle du quartier ou de l'îlot. Les leviers de conception que nous souhaitons tester sont les suivants :

- l'implantation et la volumétrie des bâtiments
- le choix des types de surfaces (végétales ou minérales)
- les albédos des différents types de surfaces

L'objectif est de d'évaluer l'influence qu'ont ces choix de conception sur les différents termes du bilan énergétique d'une surface urbaine et donc sur les potentiels bioclimatiques du quartier. Nous nous concentrons sur le bilan thermo-radiatif de la scène urbaine et cherchons à qualifier l'influence sur les potentiels suivants :

- Potentiel de chauffage passif
- Potentiel de confort d'été passif (risque de surchauffe estivale)
- Potentiel d'éclairage naturel
- Potentiel de production d'énergies renouvelables (EnR) solaires (en toiture et en façade)
- Risque de contribution à l'îlot de chaleur urbain

5.2.2.1. Présentation des scénarios

Chacun des cas d'étude est décomposé en 3 types de surfaces, les « Toits », les « Façades » et la « Rue ». La surface « Rue » comprend toutes les surfaces au sol hors emprise des bâtiments. Pour chaque cas d'étude, nous avons produit des scénarios (les acronymes des scénarios sont précisés entre parenthèses) en faisant varier les paramètres suivants :

- Albédo des différents types de surfaces
En termes d'albédo, trois types de scénarios sont définis; un scénario entièrement minéral à faible albédo (MLA, *Mineral Low Albedo*), un scénario entièrement minéral à fort albédo

⁵ <http://www.mesolia.fr/Mesolia/Notre-offre/Acheter/Logements-neufs/Residence-Neree-Ginko-Lac>

(MHA, *Mineral High Albedo*), et un scénario entièrement minéral à albédo intermédiaire (MIA, *Mineral Intermediate Albedo*). Au sein de ces scénarios, les valeurs d'albédo pour chaque type de surface ont été choisies pour représenter des valeurs typiquement faibles, hautes ou intermédiaires. Les modèles 3D utilisés pour les simulations ne prenant pas explicitement en compte les vitrages, l'albédo des façades est calculé en spécifiant une valeur d'albédo pour les parois opaques et une valeur d'albédo pour les vitrages et en faisant l'hypothèse de 33% de surfaces vitrées. Les albédos des différents types de surfaces sont récapitulés dans le Tableau 18.

– Hauteur des bâtiments

Nous avons produit des scénarios avec le nombre d'étages correspondant au plan masse (Et0), ainsi que des scénarios avec ajout de 2 étages à l'ensemble des bâtiments (Et2)

– Orientation du quartier

Nous avons produit un scénario avec l'orientation originale du plan masse, (O0), ainsi que des scénarios pour lesquels on applique à la scène urbaine une rotation de -15° (Om15), et une rotation de +15° (Op15)

– Végétalisation des différents types de surfaces

En termes de végétalisation, nous avons considéré 5 scénarios correspondant à la végétalisation de certains types de surfaces ; végétalisation de la « Rue » (Vrue), végétalisation des « Toits » (Vtoit), végétalisation des Façades (Vfac), végétalisation de l'ensemble des enveloppes, c'est-à-dire des façades et des toits (Vbat), et végétalisation de toutes les surfaces (Vtot). Pour ce qui est des albédos des différents types de surfaces végétales, nous les avons fixés identiques aux albédos du scénario MIA et ce afin de pouvoir étudier l'effet de la végétalisation indépendamment de l'effet de l'albédo.

Albédo	Rue	Toits	Façades	Façades : parties opaques	Façades : parties vitrées
Minéral faible albédo (MLA)	0,1	0,1	0,23	0,2	0,3
Minéral fort albédo (MHA)	0,4	0,7	0,57	0,7	0,3
Minéral albédo intermédiaire (MIA)	0,2	0,2	0,23	0,2	0,3

Tableau 18 - Albédos des différentes surfaces

Par la suite, nous adoptons le système de notation suivant pour nommer les différentes simulations : « CAS_JOUR_Caractéristiques des Surfaces_Orientation_Etages », avec :

- CAS = ARM (Armstrong) ou GK (Ginko)
- JOUR = HVR (solstice d'hiver) ou ETE (solstice d'été)
- Caractéristiques des Surfaces = MLA, MIA, MHA, Vrue, Vtoit, Vfac, Vbat ou Vtot
- Orientation = O0, Om15 ou Op15
- Etages = Et0 ou Et2

Ce qui donne par exemple :

- ARM_HVR_MLA_Om15_Et0 : cas d'étude ZAC Armstrong, au solstice d'hiver, scénario minéral à faible albédo, rotation de -15°, et pas d'ajout d'étages.
- GK_ETE_Vbat_O0_Et2 : cas d'étude ZAC Ginko, au solstice d'été, végétalisation des toits et des façades, pas de rotation, et ajout de deux étages.

Le nombre de combinaisons possibles est de 48 par cas d'étude et par solstice. Compte tenu de la durée des simulations et de la masse des résultats produits qu'il faudra analyser, nous avons limité le nombre de simulations à 12 par cas d'étude et par solstice (soit un total de 48 simulations). Ces

simulations, récapitulées au Tableau 19, nous permettent pour chaque cas d'étude et pour chaque solstice d'étudier les aspects suivants :

- Influence de l'albédo
- Influence de la hauteur des bâtiments à albédo constant
- Influence de l'orientation à albédo constant
- Influence des différentes stratégies de végétalisation à albédo constant

Orientation	-15°		0°		+15°	
	+0	+2	+0	+2	+0	+2
MLA	MLA_Om15_Et0	-	MLA_O0_Et0	MLA_O0_Et2	MLA_Op15_Et0	-
MHA	-	-	MHA_O0_Et0	MHA_O0_Et2	-	-
MIA	-	-	MIA_O0_Et0	-	-	-
Vtoit	-	-	Vtoit_O0_Et0	-	-	-
Vfac	-	-	Vfac_O0_Et0	-	-	-
Vbat	-	-	Vbat_O0_Et0	-	-	-
Vrue	-	-	Vrue_O0_Et0	-	-	-
Vtot	-	-	Vtot_O0_Et0	-	-	-

Tableau 19 - Récapitulatif des scénarios simulés pour chaque cas d'étude et pour chaque solstice

5.2.2.2. Simulation thermo-radiative avec le logiciel SOLENE

Pour nos deux cas d'étude, chacun des scénarios du Tableau 19 est simulé au solstice d'été et au solstice d'hiver avec le logiciel SOLENE-microclimat (Bouyer et al. 2011) (Figure 51).

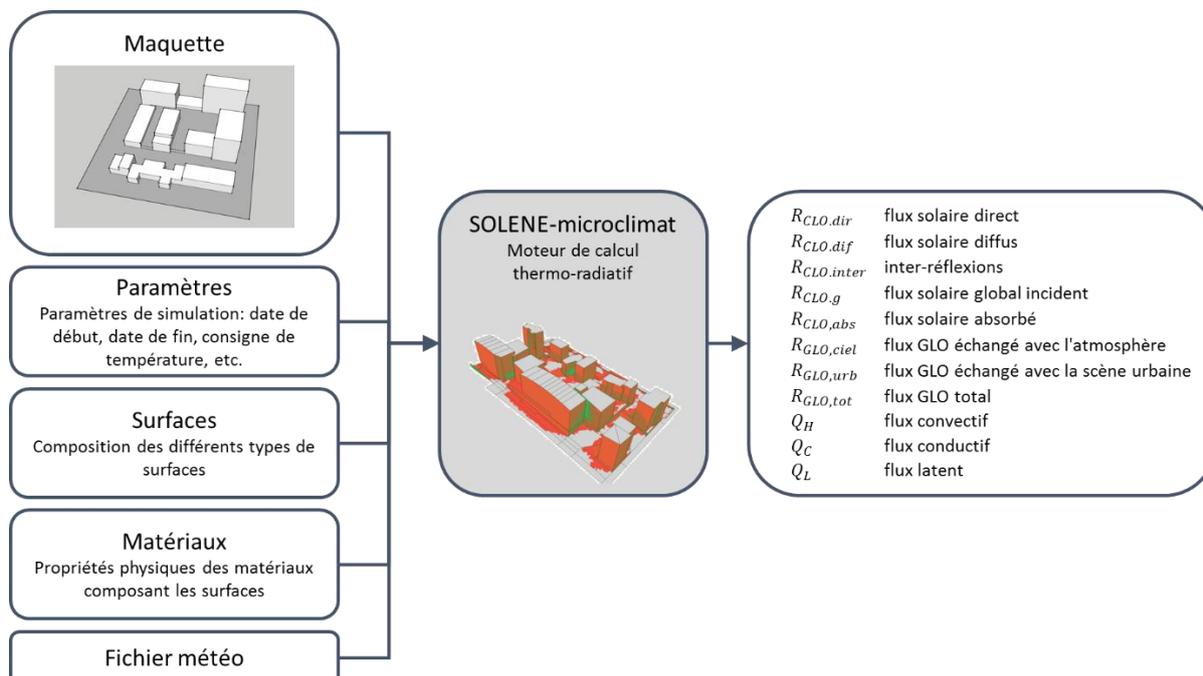


Figure 51 – Entrées et Sorties du logiciel de simulation thermo-radiative SOLENE-microclimat

Nous avons opté pour le logiciel SOLENE-microclimat pour mener notre étude de l'influence de l'environnement urbain sur les potentiels énergétiques à l'échelle du quartier notamment parce qu'il permet :

- Le calcul des inter-réflexions (CLO)

- Le calcul indépendant des flux GLO et des flux convectifs contrairement à de nombreux modèles de thermique du bâtiment qui incluent le flux GLO de manière forfaitaire dans le flux convectif (au travers d'un coefficient d'échange spécifique)
- Le calcul détaillé des échanges GLO avec le ciel d'une part et au sein de la scène urbaine d'autre part
- La prise en compte de la végétalisation des toits, des façades et des sols

SOLENE-microclimat permet pour chaque facette d'une scène urbaine triangulée, d'accéder aux sorties suivantes au pas de temps horaire :

- Température de surface (Tse)
- Flux solaire global incident ($R_{CLO.g}$); composé de la somme du flux solaire direct ($R_{CLO.dir}$), du flux solaire diffus ($R_{CLO.dif}$) et des inter-réflexions ($R_{CLO.inter}$).
- Flux GLO total ($R_{GLO,tot}$); composé de la somme du flux GLO échangé avec le ciel ($R_{GLO,ciel}$) et du flux GLO échangé avec la scène urbaine ($R_{GLO,urb}$).
- Flux convectif (Q_H)
- Flux conductif (Q_C)
- Flux latent lorsqu'il s'agit d'une facette végétale (Q_L)

Certaines de ces sorties sont directement accessibles, d'autres ont nécessité l'écriture de scripts spécifiques (Python). Nous avons également écrits les scripts permettant le calcul du cumul journaliers des résultats au pas de temps horaire, le calcul de la moyenne horaire ou journalière des différentes sorties par type de surfaces, ainsi que l'export en .csv de l'ensemble de ces résultats. Nous disposons ainsi, pour chacune des sorties listées ci-dessus, des moyennes horaires et journalières pour les Toits, la Rue, l'ensemble des façades, les façades par orientation et l'enveloppe des bâtiments (façades + toits).

5.2.2.3. Hypothèses de simulation

Type de simulation

Nous réalisons des simulations thermo-radiatives au pas de temps horaire et ce pour les journées du solstice d'hiver et du solstice d'été. Nous utilisons SOLENE-microclimat en mode non couplé, ce qui signifie que la dynamique d'écoulement de l'air n'est pas prise en compte. Pour les bâtiments, la température intérieure de consigne est constante et fixée à 19°C.

Composition et propriétés des surfaces

Ces simulations thermo-radiatives nécessitent de spécifier la composition (matériaux et épaisseurs) de chaque type de surface minérale et organique, ainsi que ses propriétés optiques (albédo et transmittance) et thermo-radiatives (émissivité) (Figure 51).

Les hypothèses de modélisation retenues pour les surfaces minérales sont récapitulées dans le Tableau 18 et le Tableau 20. Seuls les albédos varient selon les scénarios, les autres propriétés sont gardées constantes. S'agissant des façades, une modélisation explicite des vitrages rend les maquettes trop lourdes et les simulations ne fonctionnent pas. Les vitrages ne sont donc pas modélisés, du point de vue thermo-radiatif, mais du point de vue optique, ils sont pris en compte en affectant une transmittance de 0,2 aux façades (hypothèse d'un tiers de surface vitrée ayant une transmittance de 0,6).

Surfaces minérales	Matériaux (épaisseurs)	Transmittance	Emissivité
Rue	Asphalte (0,3m) / Terre (1m)	0	0,9
Toits	Laine de roche (0,15m) / Béton (0,15m)	0	0,9
Façades	Béton (0,15m) / Laine de roche (0,105m)	0,2	0,9

Tableau 20 - Composition et propriétés des surfaces minérales

S'agissant des surfaces végétales, comme présenté au Chapitre 3, de nombreux paramètres additionnels, relatifs au couvert végétal entrent en compte. La composition et les propriétés des surfaces végétales pour nos simulations sont récapitulées dans le Tableau 21. Pour les façades et toitures, ce sont les caractéristiques de l'ensemble de la façade (y compris mur ou toiture support) qui sont données.

Surfaces végétales	Matériaux (épaisseurs)	Transmittance	Emissivité
Rue	Terre (1,3m)	0	0,9
Toits	Terre (0,1m) / laine de roche (0,15m) / Béton (0,15m)	0	0,9
Façades	Terre (0,1m) / Béton (0,15m) / Laine de roche (0,105m)	0,2	0,9

Tableau 21 - Composition et propriétés des surfaces végétales

Les propriétés du couvert végétal (cf. Chapitre 3) sont gardées constantes dans les différents scénarios (Tableau 22). Les résistances aérodynamiques et stomatiques sont calculées à partir des formules préconisées par la *Food and Agriculture Organization* (Allen et al. 1998).

Epaisseur moyenne des feuilles (d)	0,2m
Indice de surface foliaire (Leaf Area Index)	2
Albédo du feuillage	Idem scénario MIA
Coefficient d'extinction du feuillage (ks)	0,9
Taux d'évapotranspiration	1
Résistance aérodynamique du feuillage	$r_{areo} = \frac{1}{k^2 v} \ln \left[\frac{2 - \frac{2}{3} * h}{0,123 * h} \right] * \ln \left[\frac{2 - \frac{2}{3} * h}{0,1 * 0,123 * h} \right]$, avec k la constante de Von Karman (égale à 0,41), v la vitesse du vent [m/s], et h l'épaisseur du feuillage [m].
Résistance stomatique du feuillage	$r_{sto} = \frac{r_f}{0,5 LAI}$, avec r_f la résistance stomatique d'une feuille isolée, égale à 100 [s/m]

Tableau 22 – Propriétés du couvert végétal

Enfin, les propriétés thermiques (conductivité thermique, capacité thermique et masse volumique) des matériaux utilisés pour la modélisation des différentes surfaces sont récapitulées dans le Tableau 23.

	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Capacité thermique (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Masse volumique (kg.m ⁻³)
Asphalte	0,75	950	2100
Terre	0,7	900	1600
Béton	1,75	1000	2300
Laine de roche	0,04	1000	30

Tableau 23 - Propriétés thermiques des matériaux utilisés dans nos modélisations

Données météo

S'agissant des données météo, nous avons eu recours à des données de type METAR, il s'agit de données météo publiques générées notamment par les stations météo situées sur les aéroports. Par soucis de comparabilité entre nos cas d'étude, nous avons fait le choix d'utiliser les mêmes données météo pour nos deux cas d'étude. En l'occurrence, il s'agit des données de la station météorologique de l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry pour les journées des 19 et 20 juin 2014 et 20 et 21 décembre 2014.

Les données extraites de ces fichiers météo et utilisées par SOLENE-microclimat sont les suivantes : Température de l'air (Tair) et humidité relative (HR).

Le flux solaire direct et le flux solaire diffus sont simulés par SOLENE-microclimat en faisant l'hypothèse théorique d'un ciel parfaitement clair (nous n'utilisons donc pas les données du fichier météo). De

même le rayonnement infrarouge descendant (non influencé par la scène urbaine) est calculé par SOLENE-microclimat. Pour le calcul du flux latent (lorsqu'il y a des surfaces végétales), l'humidité spécifique est calculée à partir de l'humidité relative et de la température de l'air à partir des formules empiriques de (Nadeau & Puiggali 1995) équations eq. 29 et eq. 30.

$$q_s = \frac{0,62 * p_{sat}(\theta) * HR}{0101325 - p_{sat}(\theta) * HR} \quad \text{eq. 29}$$

$$p_{sat}(\theta) = \exp\left(23,3265 - \frac{3802,7}{\theta + 273,18} - \left(\frac{472,68}{\theta + 273,18}\right)^2\right) \quad \text{eq. 30}$$

Dans la configuration de SOLENE-microclimat que nous utilisons, la vitesse du vent n'est pas prise en compte depuis le fichier météo. Dans cette configuration par défaut les coefficients d'échanges convectifs sont constants dans le temps et dans l'espace. En pratique cette unique valeur du coefficient d'échange convectif est fixée par défaut à $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

De manière à pouvoir juger de l'influence de ce paramètre, et donc du vent, sur nos simulations, nous avons mené une analyse sur divers paramétrages classiques des coefficients d'échange convectif qui est présentée en annexe (Annexe 4. Influence du choix des coefficients d'échange convectifs).

Cette étude préliminaire nous a permis de quantifier l'influence du paramétrage des coefficients de convection sur les températures de surface, ainsi que sur le flux convectif, les échanges GLO et le flux conductif. Indirectement cela nous renseigne sur la dépendance des résultats de nos simulations aux conditions de vent. Elle nous a permis de montrer que le coefficient h_c a peu d'effet sur les flux conductifs au niveau des façades et des toits. En accord avec Yang et al. (2012) et Malys et al. (2015) qui ont également démontré que le mode de calcul du coefficient d'échange convectif a une influence très limitée sur les besoins thermiques moyens des bâtiments, nous en déduisons que le choix de h_c a peu d'influence sur l'étude du potentiel de chauffage passif et du potentiel de confort d'été passif. Par contre nous avons également montré que le choix de h_c influe très fortement sur le bilan GLO net des différentes surfaces urbaines, l'étude de la thématique du risque de contribution à l'ICU est donc beaucoup plus sensible au choix de h_c .

Il aurait été possible de travailler avec des valeurs instantanées de h_c , dépendantes de la vitesse du vent, mais alors les résultats auraient été tributaires de la météo de la journée choisie. Au vu de notre choix de travailler sur des simulations sur une journée aux solstices, il ne nous paraît pas opportun pour la suite de calculer les coefficients d'échanges convectifs à partir des données de vent du fichier météo, puisque celles-ci ne sont pas représentatives de conditions moyennes. Nous conservons donc pour la suite la valeur de h_c proposée par défaut par SOLENE-microclimat, soit $h_c=10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Si l'on considère la formule de calcul du coefficient de convection proposée par la norme NF EN ISO 6946, cela équivaut pour nos simulations à considérer une vitesse de vent constante et homogène de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$.

Durée d'initialisation des simulations

La durée d'initialisation des simulations est un autre point sur lequel nous avons dû statuer en amont de notre campagne de simulation. Ces simulations nécessitent en effet une durée d'initialisation qu'il est difficile de définir a priori. Cette durée d'initialisation correspond au nombre de jours à simuler en amont de la date d'intérêt (ici les solstices) pour que les résultats à la date d'intérêt soient corrects du fait de l'inertie des parois.

Afin de déterminer la durée d'initialisation nécessaire, nous avons réalisé sur le cas de base ARM_MLA_O0_Et0 des simulations de durées croissantes afin d'observer comment la durée de la période d'initialisation influence les résultats obtenus le dernier jour de simulation. Les résultats que nous observons sont les températures de surface extérieures (Tse) de chacun des triangles de la scène urbaine pour chaque pas de temps du dernier jour de simulation.

Cette étude présentée en détail en annexe (Annexe 5. Détermination de la durée d'initialisation des simulations) nous a permis de déterminer qu'une durée d'initialisation d'une journée est suffisante au solstice d'hiver comme au solstice d'été.

5.2.2.4. Limites des simulations

Il est important à ce stade et avant d'aborder l'analyse des résultats, de récapituler les limites de nos simulations, qu'il faudra garder en tête à la lecture de l'analyse des résultats.

- Nous avons fait des hypothèses en termes de composition des différents types de surface, et notamment en termes d'isolation des toits et des façades pour l'ensemble de notre campagne de simulation. Notamment nos simulations concernent des bâtiments bien isolés, représentatifs de ce que l'on construit dans le cadre de la RT2012. Nous n'avons pas testé la sensibilité des résultats à ces paramètres de composition des parois.
- Nous n'avons pas de représentation explicite du vitrage. Cependant nous avons considéré le vitrage dans la définition de l'albédo des façades. Cette prise en compte indirecte des vitrages nous empêche de tenir compte des températures de surfaces différentes entre les vitrages et les parois opaques, et biaise donc les résultats en termes de température de surface des façades, flux GLO, et flux convectif. Par contre, le flux conductif au niveau des façades opaques, qui nous intéresse particulièrement n'est pas altéré. Il nous suffit en post-traitement d'appliquer ce flux sur une fraction seulement des façades (en tenant compte du taux de vitrage). Pour ce qui est des parties vitrées, les apports solaires et les pertes conductives peuvent être également évaluées en post traitement à partir des caractéristiques du vitrage, du flux solaire global incident sur les façades et de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.
- Nous réalisons des simulations thermo-radiatives de la surface urbaine. Il n'y a pas de couplage thermo-aéraulique ; la température de l'air extérieure est homogène dans la scène urbaine, il s'agit à chaque pas de temps de la température du fichier météo. L'air extérieur n'est pas influencé par le comportement thermique de la surface urbaine. Malys et al. (2015) ont montré via l'étude de différents modes de couplage entre SOLENE-microclimat et un code de CFD, que pour l'étude des besoins énergétiques des bâtiments, le couplage avec la CFD ne semble nécessaire que dans le cas de bâtiments non-isolés, et en été. Le choix de nous limiter à des simulations thermo-radiatives, qui se justifie notamment pour des raisons de temps de calcul, est donc pertinent pour l'étude des potentiels de chauffage et de confort d'été passif dans le cas de bâtiments correctement isolés. Ce qui est le cadre dans lequel nous situons notre étude. Par contre, ce choix limite les possibilités d'étude du risque de contribution à l'ICU, puisque nous n'avons pas accès à l'évolution des températures d'air.
- Enfin, le coefficient d'échange convectif est homogène et constant. Il ne dépend pas des conditions de vent. C'est une approche cohérente dans le cadre d'une simulation non couplée.
- Nous fixons la température intérieure été comme hiver. En hiver, cela est assez cohérent avec le fonctionnement du chauffage, par contre, en été, les températures varient très fortement en fonction de l'usage des bâtiments.

5.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous proposons une analyse de notre campagne de simulation en trois temps. Dans un premier temps, nous présentons le détail du bilan énergétique de surface pour les différents types de surfaces qui composent la scène urbaine. L'objectif étant de mettre en évidence les ordres de grandeur des différents flux sur chaque type de surface. Dans un second temps, nous analysons, l'influence de la forme urbaine (hauteur et orientation), et des types de surface (albédo, végétalisation). Enfin nous synthétisons les effets de ces choix de conception sur les potentiels bioclimatiques à l'échelle du quartier.

5.3.1. Ordres de grandeur des différents termes du bilan énergétique de surface

Pour procéder à l'analyse des ordres de grandeur des différents termes du bilan énergétique pour les différents types de surfaces composant la scène urbaine, nous mettons à profit les résultats obtenus au solstice d'hiver et au solstice d'été pour le scénario minéral à albédo intermédiaire MIA_OO_Et0 et pour nos deux cas d'étude (Figure 52).

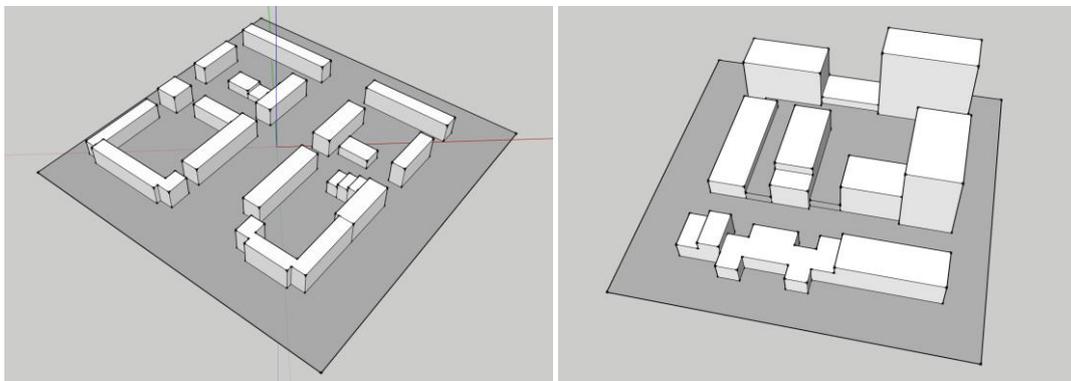


Figure 52 - Cas d'étude Armstrong - OO_Et0 (gauche) et Ginko - OO_Et0 (droite)

5.3.1.1. Flux CLO

Les Figure 53 et Figure 54 présentent, pour les scénarios ARM_MIA_OO_Et0 et GK_MIA_OO_Et0 les cumuls journaliers (solstice d'hiver et solstice d'été) des différents flux CLO (direct, diffus, inter-réflexions) sur les différentes familles de surfaces de la scène urbaine. La somme de ces trois termes spécifiée sur les graphes, constitue le flux solaire incident global. De manière générale, dans la suite de ce chapitre, et en l'absence d'indications contraires, les résultats sont présentés en cumul journalier et moyennés par type de surfaces urbaines. Ils sont exprimés en Wh/m².

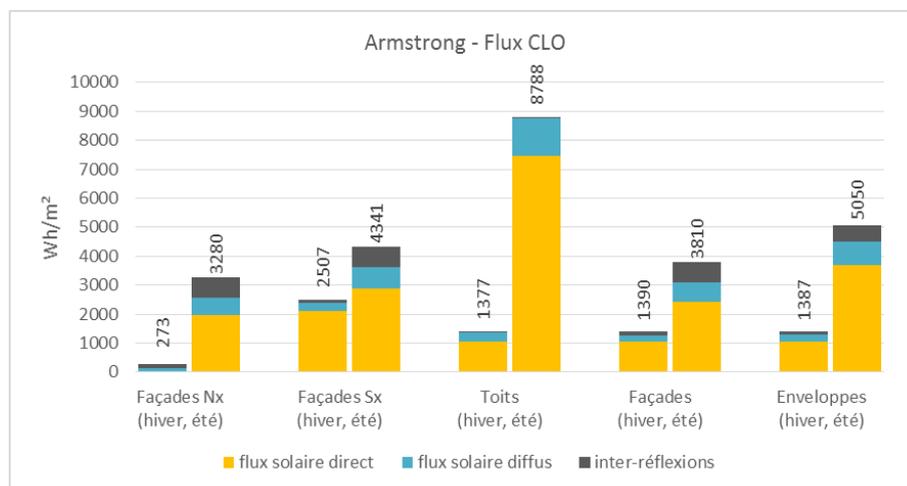


Figure 53 - Flux CLO pour le quartier Armstrong, scénario MIA_OO_Et0

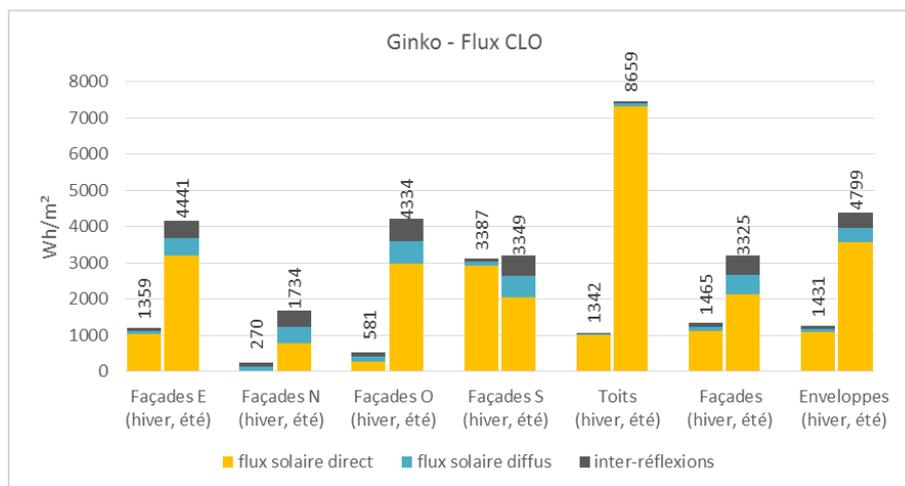


Figure 54 - Flux CLO pour le quartier Ginko, scénario MIA_OO_Et0

Dans le cas Armstrong au solstice d'hiver, le flux solaire global incident sur les façades est de 1390 Wh/m². Il s'agit à 76% de flux solaire direct, à 16% de flux solaire diffus et à 8% d'inter-réflexions. Ce comportement moyen des façades provient en fait de comportements extrêmement différents des deux groupes de façades Nx (Nord-Ouest et Nord-Est) et Sx (Sud-Ouest et Sud-Est). Pour les façades Nx, le flux solaire incident global est très faible (273 Wh/m²). Il s'agit à 53% de flux solaire diffus et à 46% d'inter-réflexions. Il est intéressant de noter que pour ces façades, les inter-réflexions sont une source d'énergie aussi importante que le flux solaire diffus. Pour les façades Sx, le flux solaire global incident est dix fois plus élevé (2510 Wh/m²). Il s'agit à 84% de flux solaire direct, à 12% de flux solaire diffus. Pour ces façades bien ensoleillées, les inter-réflexions sont donc parfaitement négligeables.

Au solstice d'été, on constate des comportements similaires pour l'ensemble des façades. Le flux solaire global incident moyen sur les façades est de 3810 Wh/m². Il s'agit à 64% de flux solaire direct, à 17% de flux solaire diffus et à 19% d'inter-réflexions. En été, le flux solaire diffus et les inter-réflexions sont du même ordre de grandeur.

Dans le cas Ginko, les ordres de grandeurs sont très similaires.

S'agissant des toits, on constate que pour nos deux cas d'étude, en hiver comme en été, les inter-réflexions sont parfaitement négligeables. Le flux solaire global incident est composé à environ 85% de flux solaire direct et 15% de flux solaire diffus en été contre respectivement 75% et 25% en hiver.

Cette analyse des flux CLO met en évidence (dans le cadre de scénarios à albédo intermédiaire) qu'en moyennes sur les façades, les inter-réflexions sont négligeables en hiver du point de vue des apports solaires (cumuls journaliers très faibles au regard du flux solaire direct). Par contre, elles ne sont pas négligeables pour les façades peu exposées au soleil pour lesquelles elles constituent une source de rayonnement CLO du même ordre de grandeur que le flux solaire diffus. En été, les inter-réflexions constituent de l'ordre de 20% des apports CLO sur les façades, elles sont du même ordre de grandeur que le flux solaire diffus. Ces résultats confirment les résultats de Hénon et al. (2011), qui ont mis en évidence la contribution significative des inter-réflexions au flux solaire absorbé par les façades.

5.3.1.2. Bilan GLO

Les Figure 55 et Figure 56 présentent, pour les scénarios ARM_MIA_OO_Et0 et GK_MIA_OO_Et0 les cumuls journaliers des flux GLO échangés avec le ciel et avec la scène urbaine pour les différentes familles de surfaces de la scène urbaine (la somme constitue le flux GLO total et est indiquée sur les graphes).

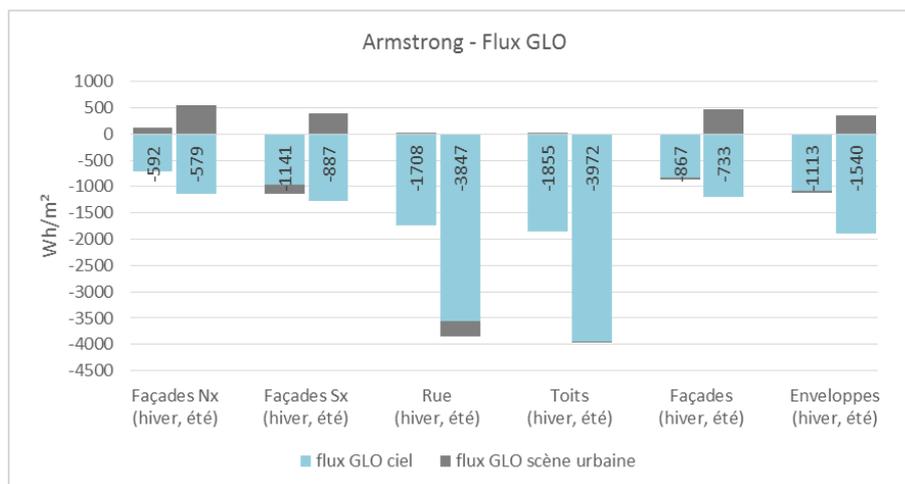


Figure 55 – Flux GLO pour le quartier Armstrong, scénario MIA_00_ET0

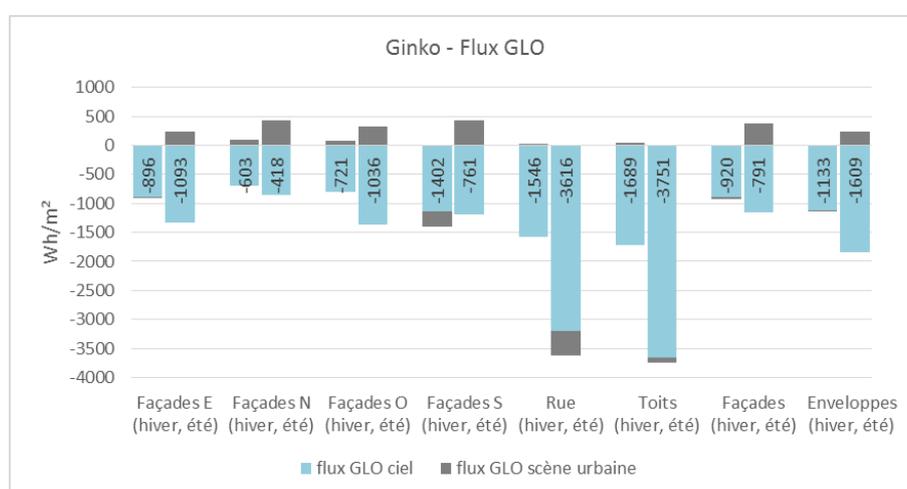


Figure 56 - Flux GLO pour le quartier Ginko, scénario MIA_00_Et0

Pour nos deux cas d'étude, les comportements généraux des différents types de surfaces, sont similaires. Dans tous les cas, et pour tous les types de surfaces, le flux GLO total constitue des pertes pour le bâtiment.

C'est au niveau des toits que le flux GLO total est le plus important (~ -1750 Wh/m² en hiver et ~ -3900 Wh/m² en été), et constitué quasi-exclusivement d'échanges GLO avec le ciel. Les échanges avec la scène urbaine sont très faibles et constituent des gains en hiver et des pertes en été.

Les façades ont des comportements différents en hiver et en été selon leur orientation. En hiver, les façades les plus ensoleillées présentent un flux GLO total de l'ordre de -1100 Wh/m², les échanges avec la scène urbaine sont relativement faibles mais non négligeables, ils constituent des pertes à hauteur de $\sim 15\%$ du total. Les façades les moins ensoleillées présentent un flux GLO total plus faible, de l'ordre de -600 Wh/m². Les échanges avec la scène urbaine sont relativement faibles mais non négligeables, ils constituent des gains. En moyenne sur les façades, en hiver, le flux GLO total s'élève à ~ -900 Wh/m² et est constitué quasi-exclusivement d'échanges avec le ciel, puisque entre façades se compensent. On constate qu'il y a très peu d'échanges GLO en hiver entre la rue et les façades.

En été, la situation est très différente, toutes les façades ont des comportements similaires, à la fois en ordre de grandeur et en termes de répartition entre échanges avec le ciel et échanges avec la scène urbaine. En moyenne sur les façades, le flux GLO total s'élève à ~ -750 Wh/m² et est composé de pertes

par échanges GLO avec le ciel, à hauteur de $\sim -1200 \text{ Wh/m}^2$ et de gains par échanges GLO avec la scène urbaine à hauteur de $\sim 450 \text{ Wh/m}^2$. En été les échanges GLO avec la scène urbaine sont tout à fait importants, notamment les échanges entre la rue et les façades constituent pour les façades des gains à hauteur de 470 Wh/m^2 pour Armstrong et 330 Wh/m^2 pour Ginko.

5.3.1.3. Bilan énergétique de surface

Après avoir étudié le détail des flux CLO et des flux GLO, nous nous intéressons au bilan énergétique des différents types de surfaces, c'est-à-dire à l'équilibre (eq. 5) entre le flux conductif (Q_C), le flux stocké (δQ_S) et les flux externes que sont le flux solaire absorbé ($R_{CLO,abs}$), le flux GLO total ($R_{GLO,tot}$), le flux convectif (Q_H).

Armstrong - Résultats au solstice d'hiver

La Figure 57 présente par types de surfaces urbaines et en cumul journalier les différents termes du bilan de surface pour le scénario ARM_MIA_OO_ET0. Le flux solaire absorbé correspond au flux solaire incident global diminué du flux solaire réfléchi. Le flux solaire absorbé est par nature toujours positif et c'est un gain d'énergie. Le flux GLO total et le flux convectif constituent des gains d'énergie s'ils sont positifs, et des pertes s'ils sont négatifs. Le flux conductif est dirigé de l'intérieur du bâtiment vers la surface extérieure. Du point de vue de cette surface extérieure il constitue donc un gain d'énergie s'il est positif (du point de vue du bâtiment il s'agit de déperditions thermiques). On constate que les résultats, sont très similaires pour les façades NE et NO, ainsi que pour les façades SE et SO. Dans la suite nous présentons donc des résultats moyens pour les façades Nx et pour les façades Sx.

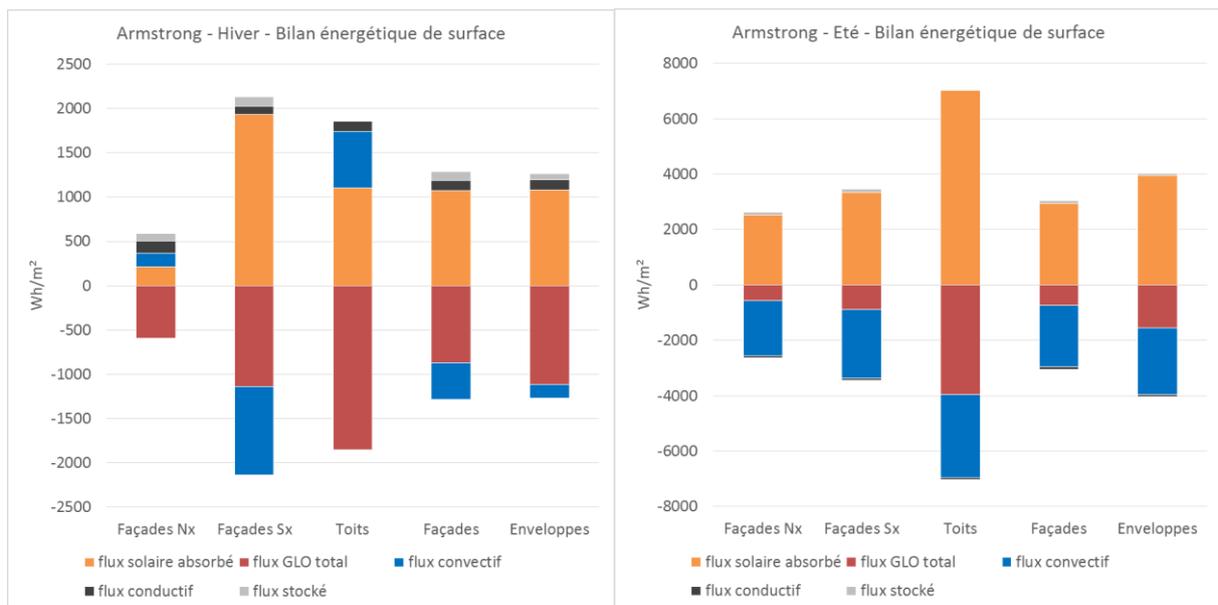


Figure 57 – Bilan énergétique de surface, Armstrong, scénario MIA_OO_Et0, solstice d'hiver (gauche) et d'été (droite)

On constate que les comportements des trois types de surfaces (Nx, Sx et Toits) sont très différents du fait de niveaux d'ensoleillement très différents; le flux solaire incident global est maximal sur les façades Sx ($\sim 2510 \text{ Wh/m}^2$). Il est 40% inférieur sur les toits ($\sim 1380 \text{ Wh/m}^2$), et dix fois plus faible sur les façades Nx ($\sim 270 \text{ Wh/m}^2$).

- Sur les façades Nx, peu ensoleillées, les différents flux sont du même ordre de grandeur et sont relativement faibles. Le flux solaire absorbé est de 210 Wh/m^2 . Le terme prépondérant est le flux GLO total qui constitue des pertes à hauteur de -590 Wh/m^2 . Le flux convectif quant à lui constitue des gains à hauteur de 150 Wh/m^2 . Le flux conductif constitue des déperditions thermiques pour les bâtiments à hauteur de -140 Wh/m^2 .

- Sur les façades Sx, qui sont plus beaucoup plus ensoleillées, les flux externes (flux solaire absorbé, flux GLO total, flux convectif) sont bien plus importants. Le flux conductif est du même ordre de grandeur que sur les façades Nx. Le terme prépondérant est le flux solaire absorbé (1930 Wh/m²). Le flux GLO total et le flux convectif constituent des pertes du même ordre de grandeur, respectivement -1140 et -990 Wh/m². Le flux conductif constitue des déperditions thermiques pour les bâtiments à hauteur de -100 Wh/m².
- Au niveau des toits on observe un troisième type de comportement. Le flux solaire absorbé est de 1100 Wh/m². Le flux GLO total constitue des pertes et est prépondérant (-1860 Wh/m²). Contrairement aux façades, le flux convectif constitue des gains à hauteur de 640 Wh/m², et non des pertes. Ici aussi, le flux conductif constitue des déperditions thermiques pour les bâtiments (-110 Wh/m²), et est du même ordre de grandeur que pour les façades.

Cette première analyse du cas Armstrong au solstice d'hiver nous montre que les flux en jeu à la surface extérieure du bâtiment sont un ordre de grandeur au-dessus des déperditions thermiques au niveau des façades opaques (en cumul journalier), dès lors que les surfaces sont ensoleillées. Cela étant dû à la relativement bonne isolation des enveloppes que nous avons considérées pour nos simulations. De ce fait, en cumul journalier, le flux conductif à travers les parois opaques des bâtiments apparaît relativement indépendant des types des surfaces et donc de la variété des sollicitations climatiques associées à chaque type de surfaces (ensoleillement direct, ensoleillement diffus, multiréflexions, échanges GLO et échanges convectifs). D'un type de surface à l'autre, on constate que les flux correspondants aux échanges avec le milieu extérieur (flux externes), c'est-à-dire, le flux solaire absorbé, le flux GLO total et le flux convectif peuvent présenter des comportements très différents. On constate également que les variations du flux conductif d'une surface à l'autre (de l'ordre de quelques dizaines de Wh/m²) sont un ordre de grandeur inférieures aux variations des flux externes (de l'ordre de quelques centaines de Wh/m²). En effet, sur l'ensemble des surfaces on observe que la somme des pertes GLO et des pertes ou gains convectifs est quasi-égale à l'éclairement absorbé total. La différence étant constituée de la somme du flux conductif et du flux stocké à la surface (calculé comme la résultante du bilan).

On peut en conclure à ce stade qu'il n'est pas possible d'utiliser des évaluations approchées des différents flux externes pour évaluer les déperditions thermiques d'un bâtiment dans une scène urbaine en hiver. Cela rejoint les résultats de Nault et al. (2015), qui ont testé la capacité d'indicateurs morpho-climatiques basés sur le calcul des niveaux d'irradiation des façades à renseigner sur les besoins thermiques des bâtiments. Les résultats ont mis en évidence des corrélations fortes. Ces indicateurs se sont en effet révélés puissants pour expliquer/interpréter des différences de besoins thermiques au sein d'un échantillon de quartiers construit à partir de variations paramétriques sur des formes de base et dont les performances sont connues par ailleurs. Néanmoins, les auteurs soulignent l'impossibilité d'établir des lois générales sur la base de ces indicateurs (qui selon la forme urbaine de base peuvent être à maximiser ou à minimiser). Ceci induit une incapacité à utiliser ce type d'indicateurs pour prédire (même dans une logique de score relatif) les besoins thermiques d'un quartier. Le recours à un modèle de thermique de bâtiment apparaît nécessaire.

Armstrong - Résultats au solstice d'été

La Figure 57 présente également les résultats au solstice d'été. De même qu'au solstice d'hiver, les résultats sont similaires pour les façades NE et NO, ainsi que pour les façades SE et SO, même s'il y a un peu plus de variabilité.

On constate, contrairement à la situation d'hiver, que les comportements des façades Nx et Sx sont proches en cumul journalier, du fait d'un ensoleillement cumulé similaire (flux solaire global incident). Le comportement des toits reste quant à lui bien différent.

- Sur les façades, les deux termes prépondérants du bilan de surface sont le flux solaire absorbé (2930 Wh/m²) et les pertes convectives (-2230 Wh/m²). Le flux GLO total constitue des pertes respectivement à hauteur de -730 Wh/m². Le flux conductif est faible et négatif, il s’agit du point de vue du bâtiment de gains (aperditions thermiques) de l’ordre de 80 Wh/m².
- Au niveau des toits, le flux solaire absorbé est bien plus important de l’ordre de 7000 Wh/m² et les pertes GLO et convectives sont du même ordre de grandeur (respectivement -3970 et -2980 Wh/m²). Le flux conductif est également faible et constitue des gains pour les bâtiments de l’ordre de 80 Wh/m².

Cette analyse montre qu’en été également, les flux en jeu à la surface extérieur du bâtiment sont un ordre de grandeur supérieur au flux conductif. Malgré des variations importantes des sollicitations climatiques selon les types de surfaces (et donc des flux externes), le flux conductif est relativement stable d’un type de surface à l’autre. De même qu’en hiver, ces résultats nous indiquent qu’il n’est pas possible d’utiliser des évaluations approchées et indépendantes des différents flux externes pour évaluer les déperditions thermiques d’un bâtiment dans une scène urbaine en été.

Ginko - Résultats au solstice d’hiver

La Figure 58 présente les résultats pour le scénario GK_HVR_MIA_OO_ET0. Le cas d’étude Ginko est très différent du cas d’étude Armstrong en termes de densité et d’orientation. Ginko présente un CES de 36% et un COS de 159%, alors que Armstrong présente un CES de 17% et un COS de 100%. Par contre la hauteur moyenne des bâtiments est similaire (15,6m pour Armstrong et 15,3m pour Ginko). Ginko est orienté 15°N, alors qu’Armstrong est orienté 41°N. Du fait de cette orientation (proche d’une orientation Nord-Sud), on pourrait s’attendre à observer trois types de comportement des façades en cumul journalier pour les façades Nord (peu ensoleillées), les façades sud (les plus ensoleillées) et les façades Est et Ouest (ensoleillement intermédiaire). En réalité, la forme générale de l’îlot proposant une gradation des hauteurs de bâtiments depuis le Sud-Ouest vers le Nord-Est induit des comportements plus complexes.

On constate en effet que les façades Est reçoivent en hiver en cumul journalier bien plus d’irradiation solaire (flux solaire global incident) que les façades Ouest.

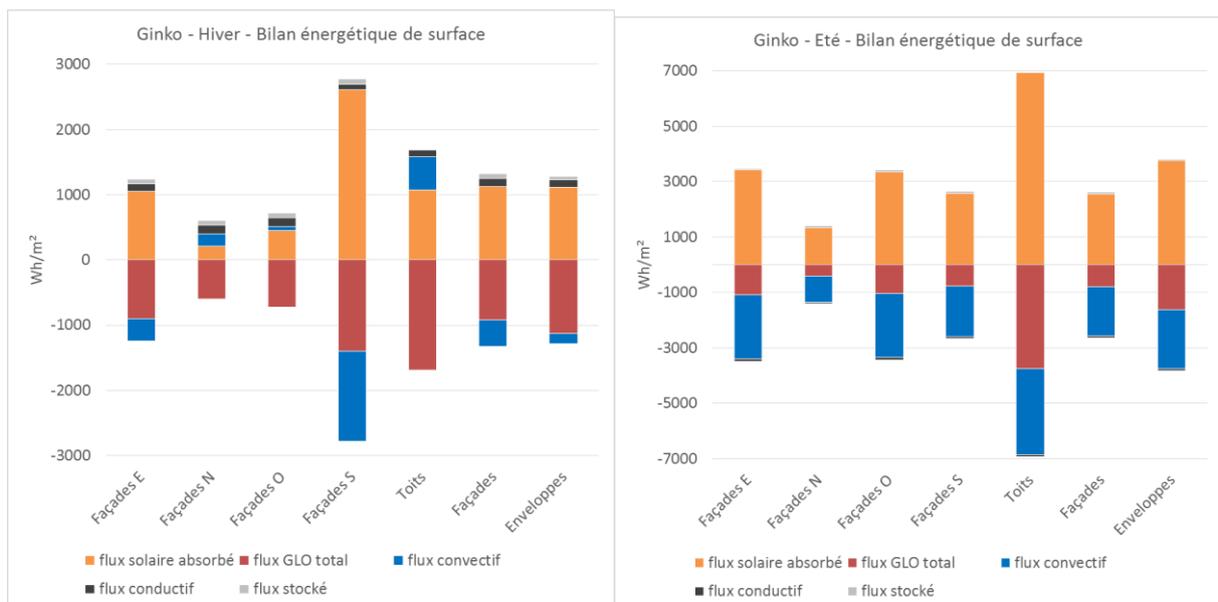


Figure 58 - Bilan énergétique par types de surfaces urbaines (cumul journalier) pour les scénarios GK_HVR_MIA_OO_Et0

Les différents types de surfaces présentent des comportements très différents en lien avec leur ensoleillement. Le flux solaire global incident est maximal sur les façades Sud ($\sim 3390 \text{ Wh/m}^2$). Il est seulement de 270 Wh/m^2 pour les façades Nord, 580 Wh/m^2 pour les façades Ouest, 1360 Wh/m^2 pour les façades Est et 1340 Wh/m^2 pour les toits.

On retrouve les mêmes types de comportements des surfaces que ceux obtenus pour le cas Armstrong, en fonction du degré d'ensoleillement des façades.

- Les toits sont principalement le siège d'un équilibre entre gains CLO et pertes GLO
- Les façades les plus ensoleillées (ici Sud et Est) sont le siège d'un équilibre entre gains CLO d'une part et pertes radiatives (GLO) et convectives d'autre part. La part des pertes convectives par rapport aux pertes radiatives augmentant avec l'intensité des gains CLO.
- Les façades les moins ensoleillées (ici Nord et Ouest) sont le siège d'un équilibre entre des gains CLO, des gains convectifs et des pertes radiatives.

Par ailleurs, de même que dans le cas Armstrong, on constate dès lors que les surfaces sont ensoleillées que les flux conductifs sont beaucoup plus faibles que les flux externes. De plus ces flux conductifs varient peu d'une surface à l'autre.

Ginko - Résultats au solstice d'été

La Figure 58 présente les résultats au solstice d'été.

Le flux solaire global incident est maximal sur les Toits ($\sim 8660 \text{ Wh/m}^2$). Il est seulement de 1730 Wh/m^2 pour les façades Nord, 3350 Wh/m^2 pour les façades Sud, 4330 Wh/m^2 pour les façades Ouest et 4440 Wh/m^2 pour les façades Est.

On retrouve les mêmes types de comportements des surfaces que ceux obtenus pour le cas Armstrong, en fonction de leur nature et de leur degré d'ensoleillement.

- Les toits sont principalement le siège d'un équilibre entre gains CLO d'une part et pertes radiatives et convectives d'autre part, ces pertes étant du même ordre de grandeur.
- Les façades sont le siège d'un équilibre entre gains CLO, pertes convectives et pertes radiatives. On constate que les pertes convectives sont environ deux fois plus élevées que les pertes radiatives.

On constate ici encore que les flux conductifs sont beaucoup plus faibles que les flux externes. Et ces flux conductifs varient peu d'une surface à l'autre.

5.3.1.4. Synthèse des résultats

L'étude détaillée des flux CLO et GLO nous a permis de dégager les éléments suivants (dans le cadre de scénarios minéraux à albédo intermédiaire) :

- En moyenne sur toutes les façades, les inter-réflexions sont négligeables en hiver du point de vue des apports solaires, parce que beaucoup plus faibles que le flux solaire direct
- les inter-réflexions ne sont par contre pas négligeables en hiver pour les façades peu exposées au soleil. Elles constituent en effet pour ces façades une source de rayonnement CLO du même ordre de grandeur que le flux solaire diffus
- en été, et sur l'ensemble des façades, les inter-réflexions ne sont pas négligeables et sont du même ordre de grandeur que le flux solaire diffus
- en hiver les échanges GLO au sein de la scène urbaine relèvent principalement des échanges entre façades. De ce fait, en moyenne sur les façades, les échanges GLO sont quasi-nuls. Par

contre si l'on considère les façades par orientation, les échanges GLO permettent une homogénéisation des températures de surfaces par échange entre elles.

- En été, des échanges GLO importants ont lieu entre les façades et la rue qui constituent des gains énergétiques pour les façades.

Par ailleurs, une analyse des ordres de grandeurs des différents termes du bilan de surface présenté dans le détail pour les toits et les façades nous a permis de mettre en évidence des comportements typiques par types de surfaces, au solstice d'hiver et au solstice d'été. Ces comportements, récapitulés dans le Tableau 24, sont communs à nos deux cas d'étude.

Comportement général des surfaces	
Hiver	Toits : principalement équilibre entre gains CLO et pertes GLO, avec également des gains convectifs limités
	Façades bien ensoleillées : équilibre entre gains CLO d'une part et pertes convectives et GLO d'autre part. La part des pertes convectives augmentant avec l'intensité des gains CLO
	Façades peu ensoleillées : mêmes comportements que les toits mais avec des flux externes de plus faible intensité
Eté	Toits : équilibre entre gains CLO d'une part et pertes convectives et GLO d'autre part, ces pertes étant du même ordre de grandeur.
	Façades : équilibre entre gains CLO, pertes convectives et pertes GLO. Les pertes convectives sont environ deux fois plus élevées que les pertes radiatives.

Tableau 24 - Comportements généraux des différents types de surfaces d'enveloppe des bâtiments (scénario MIA_00_Et0)

Enfin, pour nos deux cas d'étude et pour tous les types de surfaces (toits et façades par orientation) le flux conductif est toujours un ordre de grandeur plus faible que les flux externes. Ses variations, de l'ordre de quelques dizaines de Wh/m² sont quant à elles un à deux ordres de grandeur plus faibles que les variations des flux externes. Cela met en évidence la faiblesse des déperditions ou apertions thermiques d'un bâtiment par ses surfaces opaques au regard des flux externes (notamment apports solaires). Dès lors, il n'apparaît pas possible d'obtenir de l'information sur les déperditions ou apertions thermiques des bâtiments au travers des parois opaques sur la base d'évaluations approchées des différents flux externes : flux solaire absorbé, flux convectif et flux GLO total.

5.3.2. Effets de la forme urbaine et des types du surface sur le bilan énergétique

5.3.2.1. Effets du contexte urbain sur le bilan énergétique de surface

Afin d'étudier les effets généraux du contexte urbain sur le bilan énergétique des différents types de surfaces urbaines, nous avons également simulé le scénario MIA sur un parallélépipède équivalent au cas ARM_00_Et0. Ce parallélépipède équivalent (Figure 59) a la même surface plancher que le quartier Armstrong, la même orientation, et conserve les proportions de toits et de façades par orientations.

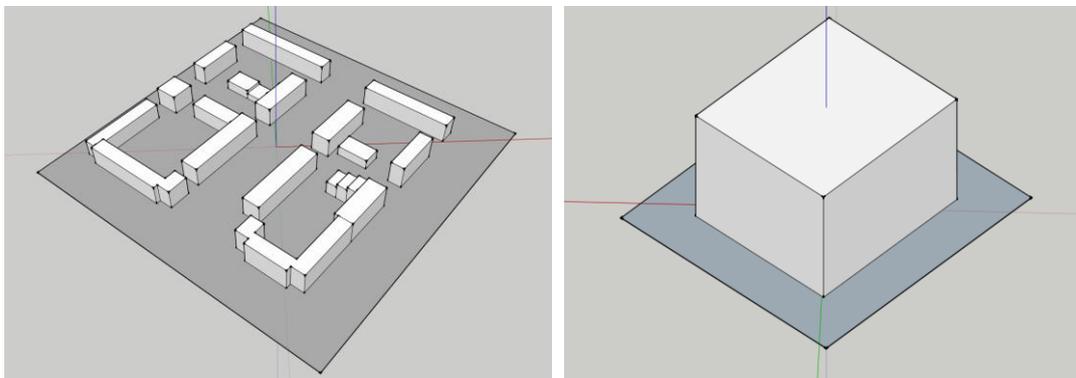


Figure 59 - Cas d'étude Armstrong (00_Et0) et parallélépipède équivalent

La Figure 60 présente le cumul journalier des flux CLO respectivement au solstice d'hiver et au solstice d'été.

En hiver, en moyenne sur les toits, l'effet du contexte urbain sur le flux solaire global incident est parfaitement négligeable pour ce cas d'étude qui présente des hauteurs de bâtiments assez homogènes, et donc très peu d'effets de masques sur les toits.

S'agissant des façades le contexte urbain entraîne une baisse de 5% de flux solaire global incident sur les façades Sx (les plus ensoleillées), et une hausse de 40% sur les façades Nx, due aux inter-réflexions. En moyenne sur les façades, le contexte urbain induit une diminution de 8% de flux solaire global incident, et une diminution de 15% du flux solaire diffus, mais qui sont quasi-entièrement compensées par les inter-réflexions, de sorte que le flux solaire global incident moyen n'est réduit que de 3%.

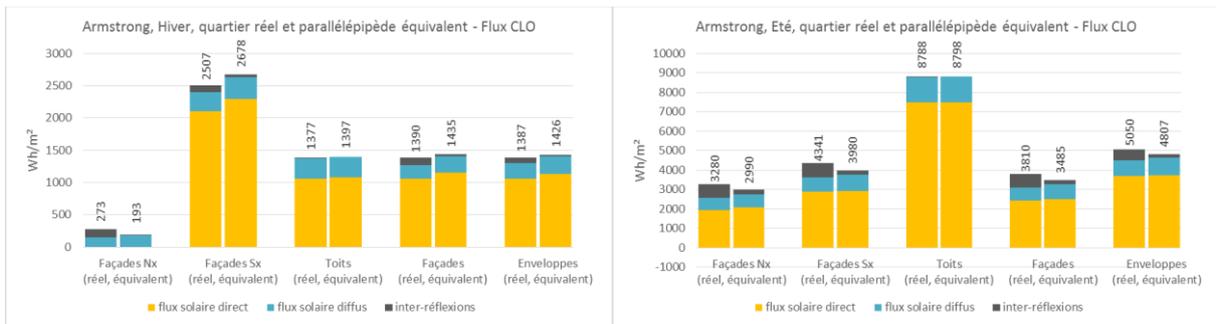


Figure 60 - Flux CLO par types de surfaces urbaines (cumul journalier) pour le scénario ARM_MIA_00_Et et parallélépipède équivalent, hiver (gauche) et été (droite)

En été, il n'y a également aucun effet sur les toits. En moyenne sur les façades, le contexte urbain induit une augmentation significative du flux solaire global incident (+9%) du fait d'inter-réflexions importantes et de diminutions limitées du flux solaire direct (-3%) et du flux solaire diffus (-12%).

La Figure 61 présente le cumul journalier des flux GLO respectivement au solstice d'hiver et au solstice d'été.

En hiver, le contexte urbain induit en moyenne sur les façades, une diminution de 21% des pertes GLO. Cette diminution provient principalement d'une diminution de 24% des pertes par échanges GLO avec le ciel. Les échanges GLO au sein de la scène urbaine constituent des gains pour les façades, mais d'amplitude beaucoup plus faible. En différenciant les façades selon leur orientation, on observe deux types de comportements; une réduction de plus de 30% des pertes GLO pour les façades Nx et une réduction plus limitée de 13% pour les façades Sx.

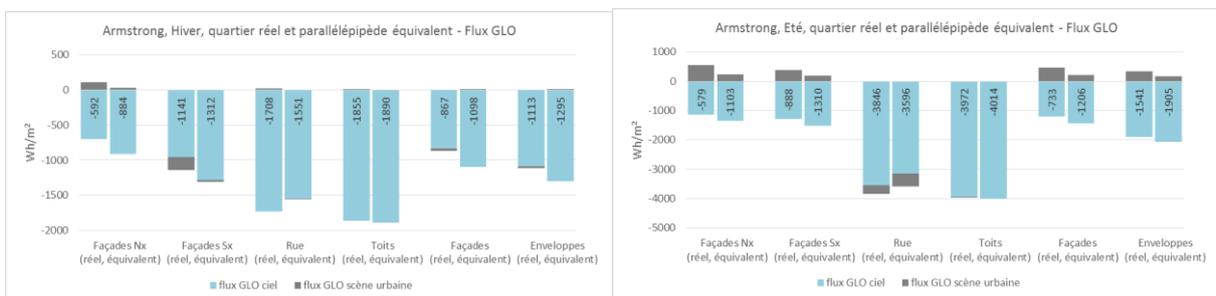


Figure 61 - Flux GLO par types de surfaces urbaines (cumul journalier) pour le scénario ARM_MIA_00_Et et parallélépipède équivalent, hiver (gauche) et été (droite)

En été, le contexte urbain induit en moyenne sur les façades, une diminution de 39% des pertes GLO qui est due pour moitié à la réduction des pertes par échanges avec le ciel et pour moitié aux gains provenant des échanges au sein de la scène urbaine. Les comportements des différentes orientations de façades sont similaires.

On observe donc du point de vue du bilan GLO, en hiver comme en été, une forte réduction des pertes GLO due à la diminution des pertes vers le ciel et aux échanges au sein de la scène urbaine.

En hiver, l'effet de l'environnement urbain sur la température de surface moyenne des façades (en moyenne journalière) est limité (+0,8°C dans le cas urbain). Ceci provient d'effets très différents sur les différentes orientations de façades ; +1,4°C en moyenne journalière pour les façades Nx et -0,2°C pour les façades Sx.

En été, l'effet de l'environnement urbain sur la température de surface moyenne des façades (en moyenne journalière) est plus prononcé (+3°C dans le cas urbain) et provient d'effets assez homogènes en moyenne journalière sur les différentes orientations de façades.

La Figure 62 présente les bilans énergétiques des différents types de surfaces, au solstice d'été et au solstice d'hiver.

Au solstice d'hiver, comme nous l'avons vu plus-haut, l'environnement urbain induit une diminution de 3% de l'éclairement incident total et donc également de l'éclairement total absorbé. Ceci, combiné avec la diminution de 21% des pertes GLO entraîne une hausse des températures de surfaces, qui induit une augmentation de 84% des pertes convectives en moyenne sur les façades. Ce nouvel équilibre en termes de flux externes induit une diminution de 5% des déperditions thermiques en moyenne pour les façades (parois opaques). Pour les façades Nx, il s'agit d'une diminution de 8% des déperditions thermiques. Pour les façades Sx, il s'agit d'une réduction de seulement 2% des déperditions thermiques.

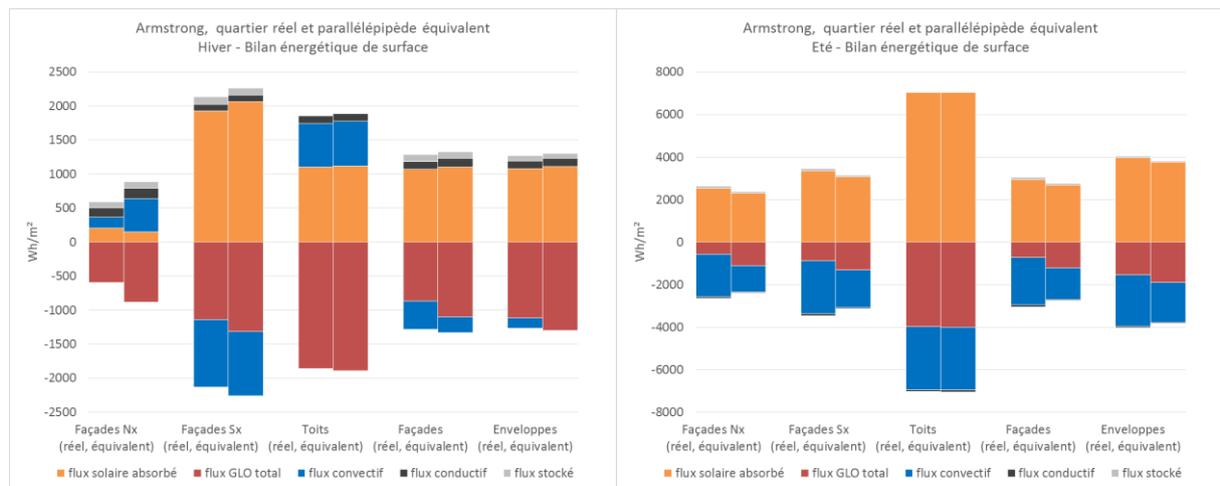


Figure 62 – Bilan énergétique par types de surfaces urbaines (cumul journalier) pour le scénario ARM_MIA_00_Et et parallélépipède équivalent, hiver (gauche) et été (droite)

Au solstice d'été, l'environnement urbain induit une augmentation de 9% de l'éclairement incident total et donc également de l'éclairement total absorbé. Ceci, combiné avec la diminution de 39% des pertes GLO entraîne une hausse des températures de surfaces des façades de 3°C. Cette hausse de températures induit une augmentation de 49% des pertes convectives en moyenne sur les façades. Ce nouvel équilibre en termes de flux externes induit une augmentation de 45% des apercutions thermiques en moyenne pour les façades (parois opaques) (+40% pour les façades Sx, +60% pour les façades NE et +50% pour les façades NO).

Afin d'appréhender l'importance de l'influence du contexte urbain sur les déperditions et apercutions thermiques, nous avons évalué en hiver et en été, les apports solaires transmis par les vitrages ainsi que les déperditions thermiques par les parois opaques (façades et toits) pour le cas Armstrong et pour

le parallélépipède équivalent (Tableau 25). Pour l'évaluation des apports solaires transmis, nous faisons les hypothèses suivantes ; i. les façades sont vitrées à 33% quelle que soit l'orientation, et ii. le facteur solaire (Sw) des fenêtres est de 0,4. Les apports solaires ainsi que les déperditions ou apertions thermiques sont rapportées au m² de plancher.

En hiver, le contexte urbain a une influence très limitée et du même ordre de grandeur, à la fois sur les apports solaires et sur les déperditions thermiques en moyenne sur les façades. Par contre nous avons vu qu'il a une influence significative sur les déperditions thermiques des façades Nx (-8%). En été, l'environnement urbain a un effet très prononcé et contre-intuitif sur les apports solaires, qui augmentent de 10% du fait des inter-réflexions lorsque le contexte urbain est pris en compte (et dans le cadre de ce scénario à albédo intermédiaire). L'influence de l'environnement urbain sur les apertions thermiques est également très significative, avec une augmentation des apertions de 41% du fait de l'augmentation des températures de surface.

Indicateurs (Wh/m ² de plancher)	hiver				été			
	ARM-P-E	ARM	Δ Wh/m ²	Δ %	ARM-P-E	ARM	Δ Wh/m ²	Δ %
Apports solaires transmis (vitrage)	99	96	-3	-3%				
Déperditions thermiques (parois opaques)	63	60	-2	-4%				
Apports solaires transmis (vitrage)					240	263	23	10%
Aperditions thermiques (parois opaques)					-31	-44	-13	41%

Tableau 25 - Comparaison des apports solaires transmis et déperditions/apertions thermiques pour le cas Armstrong (ARM) et pour le parallélépipède équivalent (ARM-P-E)

Ces comparaisons entre le cas d'étude Armstrong et son parallélépipède équivalent (bâtiment isolé) nous permettent de tirer les conclusions suivantes:

- En été comme en hiver, s'agissant de l'étude des flux CLO, et donc notamment des apports solaires, il est nécessaire de prendre en compte les inter-réflexions, dont les effets peuvent du même ordre de grandeur que les effets de masque.
- En été, l'étude de l'influence de l'environnement urbain sur les déperditions et apertions thermiques des bâtiments, au-delà de la prise en compte des masques, des inter-réflexions et des échanges GLO avec le ciel, nécessite la prise en compte des échanges GLO au sein de la scène urbaine.
- En hiver, la prise en compte des échanges GLO au sein de la scène urbaine n'est pas utile si l'étude est réalisée en moyenne sur les façades, sans différencier les orientations. Par contre, si l'on différencie les façades par orientations, la prise en compte des échanges GLO au sein de la scène urbaine devient nécessaire, notamment pour rendre compte de la diminution des déperditions thermiques sur les façades les moins ensoleillées.

Ces conclusions sur la prise en compte détaillée des échanges GLO sont en accord avec les études présentées dans le Chapitre 3. Malys et al. (2015) ont en effet étudié différents modes de calcul des échanges GLO avec le ciel et des échanges GLO au sein de la scène urbaine. Ils ont montré que par rapport au mode de calcul des échanges GLO dans SOLENE-microclimat, un calcul simplifié des échanges GLO avec le ciel conduit à une augmentation de 20% des besoins énergétiques. Ils ont également montré que la prise en compte des échanges GLO au sein de la scène urbaine induit une diminution significative des besoins thermiques. Miller et al. (2015) ont comparé des résultats de simulations EnergyPlus, avec des résultats provenant d'un couplage entre EnergyPlus (qui propose une évaluation très simplifiée des échanges GLO avec le ciel et néglige les échanges GLO au sein de la scène urbaine) et Citysim pour le calcul des échanges GLO. Les auteurs ont observé des différences pouvant atteindre 36% sur l'évaluation des besoins de chaud et 11% pour l'évaluation des besoins de froid, du simple fait du calcul plus ou moins précis des échanges GLO.

Cette analyse présentée ici, a permis de mettre en évidence que les effets de l'environnement urbain sont bien réels. Cependant, les relativement faibles différences obtenues en termes de déperditions et apercutions thermiques dans cette comparaison extrême entre un cas d'étude urbain et son équivalent-bâtiment isolé, met en avant la difficulté que nous avons constatée dans la section précédente de comparer des cas d'études urbains différents sur ce type de critère.

5.3.2.2. Effets de l'albédo sur le bilan énergétique de surface

Afin de déterminer dans le cadre de ces cas d'étude, l'effet de l'albédo des surfaces urbaines sur les différents termes du bilan énergétique de la surface urbaine, nous avons effectué des comparaisons sur les scénarios MLA_OO_Et0 et MHA_OO_Et0. Nous présentons ci-dessous les résultats de ces comparaisons pour nos deux cas d'étude.

Effet de l'albédo sur les flux CLO

Les modifications d'albédos ne changent pas les flux incidents solaires direct et diffus, mais elle modifie par contre les inter-réflexions dans la scène urbaine et donc le flux solaire global incident. Il s'agit de l'effet « indirect » de l'albédo. Par ailleurs, l'albédo détermine, la fraction du flux solaire global incident qui est absorbée par une surface, il s'agit de l'effet « direct » de l'albédo.

Afin de quantifier l'amplitude de ces effets nous comparons ci-dessous les résultats des simulations en cumul journalier et en moyenne sur la scène urbaine pour nos deux scénarios minéraux à faible albédo MLA_OO_Et0, et fort albédo MHA_OO_Et (Tableau 26).

Cumuls journaliers sur la scène urbaine (Wh/m ²)		Armstrong			Ginko		
		MLA	MHA	Δ%	MLA	MHA	Δ%
hiver	flux solaire global incident	1221	1366	12%	1319	1506	14%
	flux solaire absorbé	1038	680	-34%	1101	698	-37%
été	flux solaire global incident	6796	7449	10%	5992	6704	12%
	flux solaire absorbé	5960	3888	-35%	5206	3223	-38%

Tableau 26 - Influence de l'albédo sur les flux CLO en moyenne sur la scène urbaine

En moyenne sur la scène urbaine, les effets du passage du scénario à faible albédo au scénario à fort albédo sont similaires au solstice d'hiver et au solstice d'été, et ce pour nos deux cas d'étude. On constate une très forte augmentation des inter-réflexions qui induit une augmentation significative, de l'ordre de 10-15% flux solaire global incident. La diminution du flux solaire absorbé est de l'ordre de 35-40%. L'effet direct de l'albédo est donc prépondérant. Du point de vue de la scène urbaine, on s'attend donc à ce que l'augmentation des albédos entraîne une baisse significative des températures de surface, mais également une augmentation significative des apports solaires sur les façades. Le Tableau 27 présente les mêmes résultats que ci-dessus mais en moyenne sur les façades. On constate que pour nos deux cas d'étude, le flux solaire global incident sur les façades, et donc les apports solaires augmentent de 16% en hiver et d'environ 35% en été. Le flux solaire absorbé diminue lui de 35% en hiver et de 25% en été.

Cumuls journaliers sur les façades (Wh/m ²)		Armstrong			Ginko		
		MLA	MHA	Δ%	MLA	MHA	Δ%
hiver	flux solaire global incident	1354	1577	16%	1436	1666	16%
	flux solaire absorbé	1043	678	-35%	1106	716	-35%
été	flux solaire global incident	3507	4787	37%	3105	4174	34%
	flux solaire absorbé	2700	2058	-24%	2391	1795	-25%

Tableau 27 - Influence de l'albédo sur les flux CLO en moyenne sur les façades

Effet de l'albédo sur les bilans de surface

La hausse des albédos des différentes surfaces entraîne donc une baisse significative du flux solaire absorbé pour chacun des types de surfaces de la scène urbaine. Cette baisse induit des températures

de surface moins élevées en journée pour le scénario à fort albédo. Le Tableau 28 présente les écarts maximums observés au cours de la journée entre les températures moyennes pour chacun des types de surfaces de la scène. Les écarts de températures les plus importants concernent les surfaces les plus ensoleillées. Ils sont supérieurs à 10°C en hiver pour les toits et les façades les mieux ensoleillées. En été, ils sont un peu plus importants sur les façades qu'en hiver, mais surtout ils atteignent 35°C sur les toits et 15°C sur la rue. Nous retrouvons ici les ordres de grandeurs de réduction de températures de surface évalués par Gros et al. (2014) avec le logiciel EnvibatE dans le cadre de l'étude de peintures réfléchissantes pour un quartier de Nantes.

Différence maximale de température de surface entre les scénarios MLA et MHA (°C)

Armstrong	hiver		été		Ginko	hiver		été	
Façades Nx	0,5	11,7			Façades Est	8,7	15,6		
Façades Sx	11,2	12,4			Façades Nord	0,5	6,0		
Toits	11,4	34,7			Façades Ouest	3,7	14,2		
Rue	3,8	15,8			Façades Sud	13,3	9,1		
					Toits	11,1	34,3		
					Rue	4,0	14,9		

Tableau 28 – Différences maximales des températures de surface entre les scénarios MLA_00_Et0 et MHA_00_Et0

Les flux externes sur les différents types de surface s'en trouvent considérablement modifiés. La Figure 63 présente le bilan énergétique des façades et des toits au solstice d'hiver et au solstice d'été pour nos deux cas d'étude.

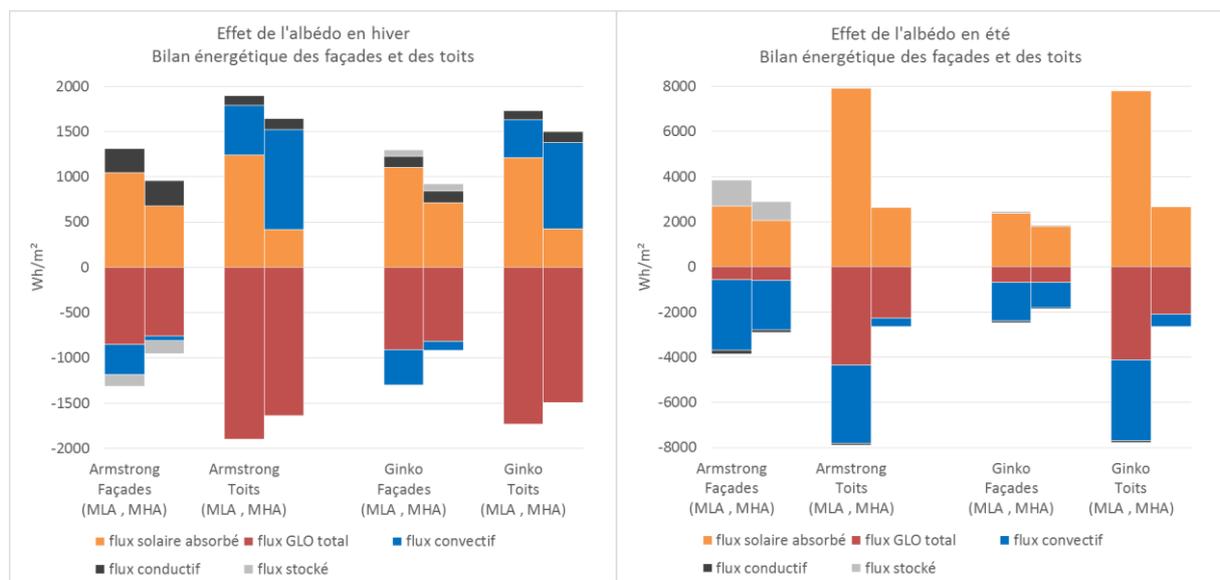


Figure 63 – Effet de l'albédo sur le bilan de surfaces sur les façades et les toits au solstice d'hiver (gauche) et au solstice d'été (droite)

Au solstice d'hiver, le comportement général des façades et des toits n'est pas modifié. Mais la diminution du flux solaire absorbé avec l'augmentation de l'albédo entraîne une faible diminution des pertes GLO pour les façades et pour les toits, ainsi qu'une forte diminution des pertes convectives pour les façades et une forte augmentation des gains convectifs pour les toits. Le flux conductif subit de légères variations. Respectivement pour Armstrong et pour Ginko, l'augmentation de l'albédo induit des augmentations de 4% et 9% des pertes conductives (déperditions thermiques par les parois opaques) pour le bâtiment. Sur les toits, il s'agit dans les deux cas d'une augmentation de 13% des déperditions thermiques.

Au solstice d'été, le comportement général des façades et des toits n'est pas non plus modifié. Mais la diminution du flux solaire absorbé entraîne une forte diminution des pertes convectives au niveau des façades, ainsi qu'une forte diminution des pertes convectives et radiatives au niveau des toits. Le flux conductif subit des variations significatives en relatif, mais dont les ordres de grandeurs sont faibles. Dans les deux cas, l'augmentation des albédos induit pour les façades une diminution de 30% des apertures thermiques pour les bâtiments, et pour les toits, une diminution de 85%.

L'augmentation de l'albédo entre les deux scénarios présente des effets concurrents. Elle entraîne en hiver une augmentation des déperditions thermiques de l'ordre de 10 Wh/m² pour les façades comme pour les toits, ce qui est un effet négatif du point de vue du potentiel de chauffage passif. Par contre elle entraîne en été une diminution des apertures thermiques de l'ordre de 30 Wh/m² pour les façades et de 80 Wh/m² pour les toits, ce qui est positif du point de vue du risque de surchauffe estivale.

Ceci est à mettre en balance avec l'effet de l'augmentation de l'albédo sur les apports solaires dont les effets sont opposés; effet positif en hiver et négatif en été. En été l'augmentation de l'albédo entraîne une augmentation des apports solaires de l'ordre de 260-280 Wh/m² de vitrage. En hiver, cette augmentation est de l'ordre de 65-70 Wh/m² de vitrage.

5.3.2.3. Effets de la géométrie urbaine sur le bilan énergétique de surface

Afin de déterminer d'étudier les effets de la forme urbaine (en termes de géométrie) sur les différents termes du bilan énergétique de la surface urbaine, nous avons simulé pour Armstrong et pour Ginko trois types de scénarios que nous comparons ci-dessous avec le scénario minéral à faible albédo MLA_OO_Et0. Ces trois scénarios sont les suivants :

- MLA_OO_Et2 : ajout de deux étages à tous les bâtiments
- MLA_Om15_Et0 : rotation de -15° de la scène urbaine
- MLA_Op15_Et0 : rotation de +15° de la scène urbaine

Effet de la hauteur des bâtiments

Une augmentation de la hauteur des bâtiments modifie l'accès des différents types de surfaces au ciel et au soleil. Avec l'ajout de deux étages à l'ensemble des bâtiments, on constate en hiver (Tableau 29), pour Armstrong comme pour Ginko une diminution de l'ordre de 5% du flux solaire incident global majoritairement dû à une baisse de 5% du flux solaire direct. En été, l'effet sur le flux solaire global incident est négligeable. En termes d'apports solaires en hiver, cela correspond à une diminution de l'ordre de 30 Wh/m² de vitrage pour Armstrong comme pour Ginko. En été, cela correspond à une diminution de 30Wh/m² de vitrage pour Armstrong et 10 Wh/m² de vitrage pour Ginko.

Le détail des cumuls journaliers des flux externes et du flux conductif (Figure 64) nous montre que les effets sont également très limités sur les pertes GLO, les pertes convectives, ainsi que sur pertes conductives en hiver et les gains conductifs en été. C'est pour le cas Armstrong et en été que l'effet est le plus prononcé (même si très limité), et cela correspond à une réduction des apertures thermiques de 4 Wh/m² de parois opaques.

Ces résultats sont intéressants parce qu'ils nous montrent que pour ces quartiers réels, et donc pour des gammes de densités réelles, un épannelage des bâtiments à +/- deux étages a peu d'incidence sur les différents flux énergétiques en cumul journalier sur les façades. Les résultats seraient bien sûr différents pour des densités urbaines plus importantes.

Cumuls journaliers sur les façades (Wh/m ²)		Armstrong			Ginko		
		Et0	Et2	Δ%	Et0	Et2	Δ%
hiver	flux solaire global incident	1354	1285	-5%	1436	1358	-5%
	flux solaire absorbé	1043	990		1106	1045	
été	flux solaire global incident	3507	3425	-2%	3105	3078	-1%
	flux solaire absorbé	2700	2637		2391	2370	

Tableau 29 - Influence de la hauteur des bâtiments sur les flux CLO en moyenne sur les façades

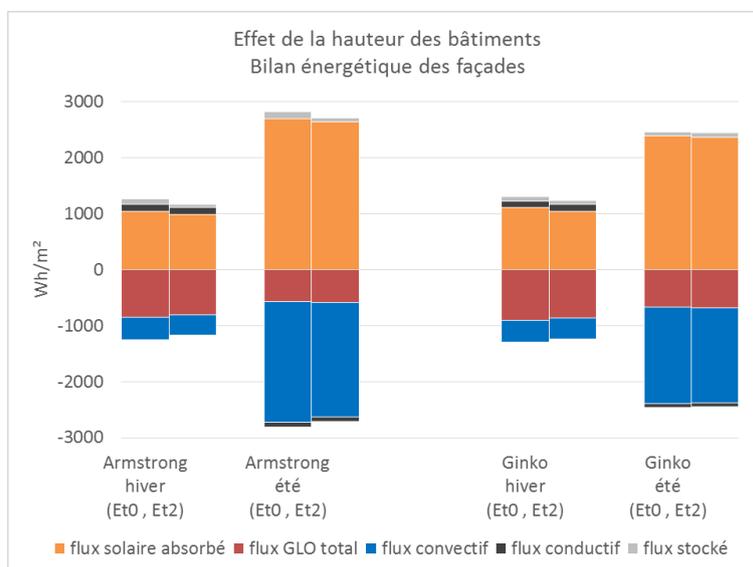


Figure 64 - Effet de la hauteur des bâtiments sur le bilan énergétique des façades

Effet de l'orientation de la scène urbaine

L'orientation du quartier modifie l'accès des différents types de surfaces au soleil. L'étude des variations avec l'orientation des différents flux CLO pour nos deux cas d'étude (Tableau 30) nous montre néanmoins que des rotations de +/- 15° de la scène urbaine ont très peu d'effet sur les différents flux CLO en cumul journalier. C'est pour Ginko, au solstice d'été, que les différences sont les plus significatives, avec 7% de différence entre les scénarios Om15 et Op15 en termes de flux solaire global incident. Cela correspond à une augmentation des apports solaires de l'ordre de 85 Wh/m² de vitrage. Comme dans le cas de la variation de hauteur des bâtiments, le détail du bilan énergétique des façades (Figure 65) nous montre que les effets sont également très limités sur les pertes GLO, les pertes convectives, ainsi que sur pertes conductives en hiver et les gains conductifs en été. S'agissant du flux conductif c'est également pour Ginko au solstice d'été que l'effet est le plus important, mais il s'agit d'une variation de seulement 6% des gains conductifs entre Om15 et Op15, soit seulement 4 Wh/m² de paroi opaque.

Cumuls journaliers sur les façades (Wh/m ²)		Armstrong					Ginko				
		O0	Om15	Δ%	Op15	Δ%	O0	Om15	Δ%	Op15	Δ%
hiver	flux solaire global incident	1354	1337	-1%	1364	1%	1436	1455	1%	1404	-2%
	flux solaire absorbé	1043	1029		1051		1106	1120		1081	
été	flux solaire global incident	3507	3449	-2%	3436	-2%	3105	3039	-2%	3248	5%
	flux solaire absorbé	2700	2655		2646		2391	2340		2501	

Tableau 30 - Variation des flux CLO (cumul journalier en moyenne sur les façades) avec l'orientation

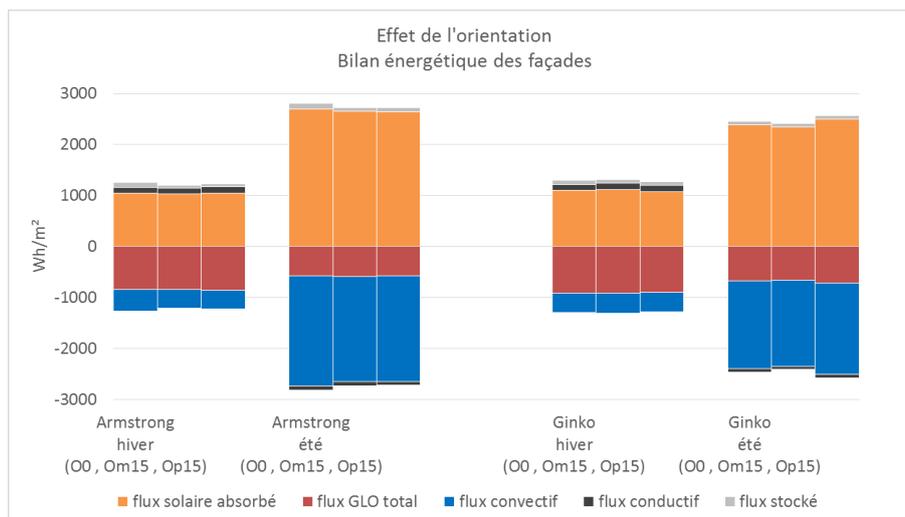


Figure 65 - Effet de l'orientation de la scène urbaine sur le bilan énergétique des façades

De même que dans notre analyse de l'effet de la hauteur, nous montrons ici pour des quartiers réels, que la variation de l'orientation de la scène urbaine de +/- 15° a une incidence très marginale sur les différents flux énergétiques en cumul journalier sur les façades. Or les deux cas étudiés sont très différents, d'une part en termes de densité (CES et COS), mais également en terme de forme. Armstrong est construit sur un plan à base carrée et à symétrie centrale, avec des hauteurs de bâtiments assez homogènes et une orientation 41°N. Ginko est basé sur un plan à symétrie axiale (selon un axe ~ S0-NE), propose une gradation des hauteurs du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est, et est orienté 15°N. Le peu d'influence de l'orientation, en moyenne sur les façades pour deux formes urbaines aussi différentes nous montrent qu'à l'échelle d'un quartier avec des bâtiments orientés suivant les deux axes de la trame viaire, des indicateurs basés sur des sollicitations climatiques moyennées sur les façades ne sont pas pertinents pour discriminer des formes urbaines selon leurs potentiels énergétiques.

5.3.2.4. Effet de la végétation sur le bilan énergétique de surface

Dans cette section nous comparons les résultats obtenus pour les différents scénarios de « végétalisation » de la scène urbaine ; V_{rue} (rue végétale), V_{toit} (toits végétaux), V_{fac} (façades végétales), V_{bat} (toits végétaux et façades végétales), et V_{tot} (rue, façades et toits végétaux).

Le Tableau 31 présente les écarts maximums de températures entre les scénarios végétaux et le scénario MIA pour le cas Armstrong et pour les différents types de surfaces (façades, toits et rue). Les résultats obtenus pour Ginko sont très similaires.

Nous avons fixé pour les surfaces végétales des albédos identiques à ceux du scénario MIA afin que les différentes stratégies de végétalisation n'aient pas d'effet sur les flux CLO. Par contre, les surfaces végétales induisent un nouveau flux externe en journée, le flux latent qui provient de l'évapotranspiration des plantes, et qui contribue à refroidir directement les surfaces support de végétation, et indirectement (via échanges GLO), les surfaces minérales qui « voient » les surfaces végétales (ces surfaces apparaissent en vert dans le Tableau 31). La nuit, il n'y a pas d'évaporation, donc pas de flux latent. Par contre, le couvert végétal baisse moins en température que les surfaces minérales et contribue donc à modérer les baisses de températures des surfaces qu'il couvre. Ces surfaces sont donc plus chaudes que dans le scénario MIA (ces surfaces apparaissent en rouge dans le Tableau 31).

Différence maximale de température de surface entre le scénario MIA et les scénarios de végétalisation (°C)

Armstrong			Δ MIA - Vtoit	Δ MIA - Vfac	Δ MIA - Vbat	Δ MIA - Vrue	Δ MIA - Vtot
hiver	Façades	Journée	0	14	14	1	14
		Nuit	0	-9	-8	0	-9
	Toits	Journée	12	0	12	0	12
		Nuit	-8	0	-8	0	-7
	Rue	Journée	0	0	0	9	9
		Nuit	0	-1	-1	-12	-12
été	Façades	Journée	0	28	28	8	28
		Nuit	0	-4	-4	0	-4
	Toits	Journée	43	0	43	0	43
		Nuit	-7	0	-7	0	-7
	Rue	Journée	0	1	1	54	54
		Nuit	0	-1	-1	-5	-5

Tableau 31 - Armstrong – Différences maximales de températures de surface entre le scénario MIA et les scénarios végétaux

On observe en premier lieu en été comme en hiver que la végétalisation d'un type de surface n'a pas d'effet significatif sur les températures des autres types de surfaces. C'est-à-dire que les échanges GLO entre les différents types de surfaces ne modifient pas significativement les températures de surfaces. Ce résultat est évident pour les toits qui ne voient pas la rue et voient très peu les façades, mais était moins attendu en ce qui concerne les interactions entre la rue et les façades.

Les différences de températures de surface entre scénarios végétaux et scénario minéral sont tout à fait significatives. En hiver, il s'agit de différence de l'ordre de la dizaine de degrés, la journée comme la nuit. Ce sont les façades végétales qui sont le plus impactées la journée (-14°C) et la rue végétale qui est le plus impacté la nuit (+12°C). En été, les différences en journée atteignent -54°C, -43°C et -28°C respectivement pour la rue, les toits et les façades dans le cas végétal. La nuit, les différences de températures sont un peu réduites par rapport à l'hiver.

Le Tableau 32 présente l'effet de la végétalisation des toits, des façades et de la rue, sur les différents termes du bilan énergétique des façades. Les façades voyant très peu les toits, ces résultats confirment que la végétalisation des toits n'a pas d'influence sur les façades. En hiver la végétalisation des façades a un effet non négligeable sur les déperditions thermiques en façade (-12%). Cette diminution des déperditions thermiques par les parois opaques des bâtiments est due à un nouvel équilibre résultant de l'apparition d'un flux latent à hauteur de -435 Wh/m², accompagnée d'une réduction des pertes GLO (-15%) et une augmentation des pertes convectives (+8%). En hiver, la végétalisation de la rue n'a pas d'effet significatif sur le bilan énergétique des façades. En été, la végétalisation des façades entraîne une modification complète du comportement des façades, avec l'apparition d'un flux latent très important (-3330 Wh/m²), le passage de pertes GLO à des gains GLO, la quasi disparition des pertes convectives et le passage d'aperditions thermiques à hauteur de 85 Wh/m² à des déperditions thermiques à hauteur de 20 Wh/m². En été, et contrairement à la situation d'hiver, la végétalisation de la rue a une influence significative sur le comportement des façades ; Les pertes GLO doublent quasiment (du fait des échanges GLO avec la rue plus froide), les pertes convectives diminuent de 29% et les aperditions thermiques pour les bâtiments baissent de 28%.

Armstrong Cumuls journaliers sur les façades (kWh/m ²)		MIA	Vtoit	Δ%	Vfac	Δ%	Vrue	Δ%
hiver	flux solaire absorbé	1070	1070	0%	1070	0%	1070	0%
	flux GLO total	-867	-866	0%	-738	15%	-894	-3%
	flux convectif	-420	-421	0%	-452	-8%	-399	5%
	flux latent	0	0	-	-434	-	0	-
	flux conductif	117	117	0%	103	12%	118	-1%
	flux stocké	99	101	-1%	451	-354%	104	-5%
été	flux solaire absorbé	2934	2934	0%	2934	0%	2934	0%
	flux GLO total	-733	-741	-1%	278	-	-1414	-93%
	flux convectif	-2228	-2220	0%	-70	97%	-1572	29%
	flux latent	0	0	-	-3332	-	0	-
	flux conductif	-84	-84	0%	19	122%	-61	28%
	flux stocké	112	112	0%	171	-53%	113	-1%

Tableau 32 – Armstrong - Effet des différents scénarios de végétalisation sur le bilan énergétique des façades

Le Tableau 33 Tableau 32 présente l'effet de la végétalisation des toits, des façades et de la rue, sur les différents termes du bilan énergétique des toits. On constate qu'en été comme en hiver, la végétalisation des façades ou de la rue n'a aucune influence sur le comportement des toits. En hiver la végétalisation des toits a un effet non négligeable sur les déperditions thermiques en toiture (-14%). Cette diminution des déperditions thermiques en toiture est due à un nouvel équilibre résultant de l'apparition d'un flux latent important à hauteur de -313 Wh/m², accompagnée principalement d'une augmentation des gains convectifs (+32%). En été, L'apparition d'un flux latent à hauteur de -4029 Wh/m², est accompagnée d'une forte diminution des pertes GLO (-46%) et des pertes convectives (-69%), et de l'annulation des apercditions thermiques.

Les bénéfices à attendre de la végétalisation des toits, en termes de besoins thermiques des bâtiments, peuvent donc s'étudier en faisant abstraction du contexte urbain. Ceci est dû au fait que nous ne réalisons pas de couplage entre le bilan énergétique de l'air extérieur et le bilan énergétique des différentes surfaces urbaines (la température de l'air extérieur à chaque pas de temps est celle du fichier météo et n'est pas influencée par les températures de surface). Cependant (Malys 2012) a également montré par le biais de simulation couplées (thermo-aérauliques) réalisées avec SOLENE-microclimat qu'à l'échelle du fragment urbain, les toitures végétales ont un effet très limité sur les caractéristiques de l'air au sein de la rue et sur le comportement thermique des constructions proches.

Armstrong Cumuls journaliers sur les toits (kWh/m ²)		MIA	Vtoit	Δ%	Vfac	Δ%	Vrue	Δ%
hiver	flux solaire absorbé	1101	1101	0%	1101	0%	1101	0%
	flux GLO total	-1855	-1873	-1%	-1855	0%	-1855	0%
	flux convectif	643	846	-32%	643	0%	643	0%
	flux latent	0	-313	-	0	-	0	-
	flux conductif	111	95	14%	111	0%	111	0%
	flux stocké	0	143	-	-1	-	0	-
été	flux solaire absorbé	7030	7030	0%	7030	0%	7030	0%
	flux GLO total	-3972	-2163	46%	-3986	0%	-3973	0%
	flux convectif	-2979	-923	69%	-2966	0%	-2977	0%
	flux latent	0	-4029	-	0	-	0	-
	flux conductif	-79	0	100%	-79	0%	-79	0%
	flux stocké	0	84	-	0	-	0	-

Tableau 33 – Armstrong - Effet des différents scénarios de végétalisation sur le bilan énergétique des toits

5.3.3. Effets sur les potentiels bioclimatiques à l'échelle du quartier

Dans les sections précédentes, nous avons étudié les effets de variations de forme et de types de surfaces sur le bilan énergétique de surface. Ces variations représentent des choix de conception qui sont actés par le projet d'aménagement de manière définitive, ou qui à défaut peuvent prendre la forme de prescriptions paysagères et architecturales. Nous avons notamment détaillé la manière dont

ces variations affectent les flux externes ainsi que les déperditions ou apertions thermiques au niveau des bâtiments (façades opaques et toiture).

Dans cette section, nous proposons une synthèse de l'analyse de ces effets sous le prisme de potentiels bioclimatiques à l'échelle du quartier. Nous présentons ci-dessous (Tableau 34) les six potentiels bioclimatiques considérés, ainsi que les indicateurs sélectionnés pour en rendre compte (grandeurs accessibles via nos simulations). Ces indicateurs permettent la comparaison de cas d'études ou de scénarios, relativement à chacun des potentiels bioclimatiques.

Eclairage naturel

La mesure la plus communément utilisée pour statuer sur la qualité de l'éclairage naturel dans un local est le Facteur de Lumière du Jour (FLJ). Il s'agit du rapport de l'éclairement naturel intérieur reçu en un point (généralement le plan de travail ou le niveau du sol) à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale, en site parfaitement dégagé, par ciel couvert. Ce facteur met donc l'accent sur la géométrie du local, les propriétés optiques du vitrage et le facteur de vue du ciel des fenêtres. Afin d'évaluer un potentiel d'éclairage naturel au nu extérieur des parois il faudrait donc idéalement avoir accès à l'éclairement lumineux diffus des façades. Or SOLENE-microclimat ne permet pas de calculer l'éclairement lumineux des surfaces urbaines. Comme nous l'avons présenté, il permet de calculer les flux CLO, qui intègre le spectre visible, mais également le proche infrarouge. Il y a donc un parallèle entre flux CLO et éclairement lumineux. Afin d'étudier le potentiel d'éclairage naturel au nu extérieur des parois, nous choisissons donc comme indicateur l'éclairement diffus en moyenne sur les façades (au solstice d'été et au solstice d'hiver). Il s'agit du flux solaire diffus auquel nous ajoutons les inter-réflexions, puisque nous avons vu que dans un cadre urbain elles peuvent jouer un rôle tout à fait significatif sur les façades peu ensoleillées. S'agissant des inter-réflexions, il est à noter toutefois qu'elles proviennent à la fois du flux solaire direct et du flux solaire diffus. Par ailleurs elles sont régies par les albédos des différentes surfaces urbaines. Le fait de les considérer dans le cadre de la thématique de l'éclairage revient à faire l'hypothèse que les albédos des surfaces et leurs coefficients de réflexion dans le visible sont similaires.

Production d'EnR solaire

Pour ce qui est des potentiels de production d'ENR solaires en toiture et en façades, nous optons respectivement pour le cumul journalier du flux solaire global incident en moyenne sur les façades et en moyenne sur les toits (que nous considérons également aux deux solstices), et sur la base duquel il est possible de procéder à une évaluation de la production d'un m² de panneaux PV ou de panneaux ST aux solstices.

Îlot de Chaleur Urbain

Comme évoqué précédemment, notre étude ne prenant pas en compte le couplage entre l'air extérieur et les surfaces urbaines, elle ne permet pas d'accéder directement au phénomène d'ICU (les évolutions de la température de l'air extérieur ne sont pas simulées). Pour aborder de manière indirecte le risque de contribution à l'ICU, nous nous intéressons au cumul journalier du flux convectif sur l'ensemble des surfaces urbaines. Il s'agit en effet de la quantité de chaleur cédée à l'air par la surface urbaine. Nous l'exprimons en Wh/m² (la surface considérée est la superficie du quartier).

Chauffage passif et confort d'été passif

S'agissant du potentiel de chauffage passif et de confort d'été passif à l'intérieur des bâtiments, trois phénomènes entrent en jeu :

- les apports solaires transmis par les surfaces vitrées
- les déperditions ou apercditions thermiques via les parois opaques (flux conductif)
- les déperditions ou apercditions thermiques via les surfaces vitrées (flux conductif vitrage)

à cela il faudrait également ajouter les effets de la ventilation qui prendraient en compte l'effet de l'ICU, mais nos simulations ne nous y donnent pas accès.

Afin de pouvoir aborder ces thématiques nous avons besoin de faire des hypothèses sur les vitrages qui ne sont pas pris en compte dans nos simulations. Nous faisons les hypothèses suivantes:

- Les façades sont vitrées à 33% quelle que soit l'orientation
- Le facteur solaire (S_w) des fenêtres est de 0,4
- Le coefficient de transmission thermiques des fenêtres (U_w) est de 1,4 W/(m².K)

Les apports solaires sont évalués selon l'équation eq. 31. Les déperditions ou apercditions thermiques via les surfaces vitrées sont évaluées sur la base du coefficient U_w et de la différence entre la température de l'air extérieur (fichier météo) eq. 32 et la température intérieure fixée à 20°C pour l'ensemble de nos simulations. Nous ne considérons ces apercditions ou déperditions thermiques qu'en hiver, puisqu'en été cela reviendrait à chauffer la nuit et climatiser en journée, ce qui n'a pas de sens pour le climat tempéré de nos études.

$$\text{apports solaires transmis} = S_w * \text{flux solaire global incident} \quad \text{eq. 31}$$

$$\text{déperditions thermiques via surfaces vitrées} = U_w * (T_{int} - T_{ext}) \quad \text{eq. 32}$$

Pour étudier le potentiel de chauffage passif à l'échelle du quartier, nous définissons un indicateur pour chacune de ces sous-thématiques. Afin d'intégrer les différences de géométrie (proportion des différents types de surfaces, compacité des bâtiments), ces indicateurs sont exprimés par m² de plancher :

- Cumul journalier (solstice d'hiver) des apports solaires transmis par les surfaces vitrées exprimés par m² de plancher
- Cumul journalier (solstice d'hiver) des déperditions thermiques par les surfaces vitrées exprimées par m² de plancher
- Cumul journalier (solstice d'hiver) des déperditions thermiques par les surfaces opaques (flux conductif) exprimées par m² de plancher

Pour étudier le potentiel de confort d'été passif à l'échelle du quartier, nous avons sélectionné les indicateurs suivants :

- Cumul journalier (solstice d'été) des apports solaires transmis par les surfaces vitrées exprimés par m² de plancher
- Cumul journalier (solstice d'été) des apercditions thermiques par les surfaces opaques (flux conductif) exprimées par m² de plancher

Relativement à chacun des potentiels qu'ils représentent, certains de ces indicateurs sont à maximiser (en vert dans le Tableau 34) et d'autres sont à minimiser (en rouge). Par ailleurs, certains objectifs sont contradictoires comme par exemple la maximisation du flux solaire global incident en façade pour le chauffage passif ou la production d'EnR, et sa minimisation pour favoriser le potentiel de confort passif en été.

Il faut également noter que certaines stratégies sont contradictoires avec certains potentiels. La végétalisation du bâtiment ou la prescription des albédos pour les bâtiments est contradictoire avec

la pose de panneaux solaires pour la production d'EnR. Dans l'analyse proposée ci-après, nous faisons abstraction de ces contradictions. S'agissant des résultats relatifs au potentiel de production d'EnR il faut alors considérer que l'on s'intéresse au potentiel concernant une superficie limitée de toits ou de façades, alors que les stratégies en termes de végétalisation ou d'albédo concernent l'ensemble du quartier.

Potentiels	Indicateurs
Eclairage naturel	éclairage diffus journalier moyen sur façades (Wh/m ² de façades)
Production EnR solaires en toiture	flux solaire global incident journalier moyen sur toits (Wh/m ² de toits)
Production EnR solaires en façade	flux solaire global incident moyen sur façades (Wh/m ² de façades)
Chauffage passif	Apports solaires transmis (vitrage) (Wh/m ² de plancher)
	Déperditions thermiques (vitrage) (Wh/m ² de plancher)
	Déperditions thermiques (parois opaques) (Wh/m ² de plancher)
Confort d'été passif	Apports solaires transmis (vitrage) (Wh/m ² de plancher)
	Déperditions thermiques (parois opaques) (Wh/m ² de plancher)
Îlot de chaleur urbain	Cumul journalier des flux convectifs (Wh/m ² de quartier)

Tableau 34 - Potentiels bioclimatiques et indicateurs associés

Afin de synthétiser l'influence de divers paramètres de conception du projet d'aménagement sur les potentiels bioclimatiques d'un quartier, nous proposons une analyse des effets de l'albédo, de la hauteur des bâtiments, de l'orientation de la scène urbaine et de la végétalisation des surfaces via le prisme des indicateurs de potentiels bioclimatiques présentés ci-dessus. Les scénarios sélectionnés ici pour évaluer l'influence de chaque paramètre de conception du projet d'aménagement sont précisés dans le Tableau 35.

Scénarios comparés		
Albédo	MLA_OO_Et0 > MHA_OO_Et0	Augmentation des albédos des différentes surfaces; Façades : 0,23 --> 0,57; Toits : 0,1 --> 0,7; Rue : 0,1 --> 0,4
Végétalisation	MIA_OO_Et0 > Vbat_OO_Et0	Végétalisation des toits et des façades, à albédos équivalents (Façades : 0,23 ; Toits : 0,2 ; Rue : 0,2)
Hauteur	MLA_OO_Et0 > MLA_OO_Et2	Ajout de deux étages à tous les bâtiments dans le scénario à faible albédo (Façades : 0,23 ; Toits : 0,1 ; Rue : 0,1)
Orientation	MLA_OO_Et0 > MLA_Om15_Et0	Modification de -15° de l'orientation du plan masse dans le scénario à faible albédo (Façades : 0,23 ; Toits : 0,1 ; Rue : 0,1)

Tableau 35 – Scénarios considérés pour évaluer les effets des différents paramètres de conception sur les potentiels bioclimatiques

Les différences entre scénarios obtenues pour nos cas d'étude sont synthétisées dans le Tableau 36. Les effets positifs et négatifs significatifs (c'est-à-dire correspondant à des variations des indicateurs supérieures à 5%) sont mis en évidence respectivement en vert foncé et rouge. Les effets positifs et négatifs négligeables sont mis en évidence respectivement en vert clair et rose.

Concernant le potentiel d'éclairage naturel, en hiver comme en été, la variation d'albédo a une influence significative pour nos deux cas d'étude. Cette influence déjà très importante en hiver (+70% pour Armstrong et +75% pour Ginko) est encore amplifiée en été (+118% pour Armstrong et +109% pour Ginko). On note que l'ajout de deux étages a une influence significative mais limitée (-5%) pour Ginko en hiver.

Le potentiel de production d'EnR solaire en toiture est très peu affecté par les variations que nous avons testées. La seule influence significative mais limitée (+5%) concerne l'augmentation des albédos, en hiver et seulement pour le cas Ginko.

Le potentiel de production d'EnR solaire en façades est globalement plus sensible aux variations que nous avons testées. L'augmentation des albédos augmente ce potentiel de 16% en hiver et environ 35% en été pour nos deux cas d'étude. L'ajout de deux étages aux bâtiments entraîne pour nos deux cas d'étude, et en hiver seulement, une diminution limitée de l'ordre de 5% de ce potentiel.

Le risque de contribution à l'ICU est très sensible à l'augmentation des albédos avec une diminution journalière de la quantité de chaleur cédée à l'air par la scène urbaine de l'ordre de 1300 Wh/m² pour nos deux cas d'étude. La végétalisation des bâtiments a également une influence du même ordre, et qui est plus marquée dans le cas de Ginko. L'augmentation de la hauteur des bâtiments a un effet positif significatif même s'il est plus limité. L'augmentation des masques solaires induit en effet une diminution de l'ordre de 10% du cumul journalier des flux convectifs pour nos deux cas d'étude.

S'agissant du potentiel de chauffage passif, les variations que nous avons testées n'ont par définition pas d'effet sur les déperditions thermiques par les surfaces vitrées, puisque celles-ci dépendent des caractéristiques du vitrage et de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur qui n'est pas modifiée par nos simulations. L'augmentation des albédos a un effet significatif et positif sur les apports solaires transmis, et un effet significatif et négatif sur les déperditions thermiques par les parois opaques. Ces effets, sont similaires pour nos deux cas d'étude et du même ordre de grandeur. Les gains supplémentaires en termes d'apports solaires sont deux fois et demie plus élevés que les déperditions thermiques supplémentaires. La végétalisation des bâtiments n'a quant à elle une influence significative et positive qu'en termes de réduction des déperditions thermiques par les parois opaques (-10% pour Armstrong et -14% pour Ginko). L'augmentation de la hauteur des bâtiments a une influence négative que sur les apports solaires (-5% pour Armstrong et -9% pour Ginko) et une influence positive sur les déperditions thermiques (-7% pour Armstrong et -12% pour Ginko).

Pour ce qui est du potentiel de confort passif en été, l'augmentation des albédos a à la fois un effet significatif et négatif sur les apports solaires transmis (~+35%), et un effet significatif et positif sur les déperditions par les parois opaques (-96% d'aperditions thermiques pour Armstrong, -119% pour Ginko). Ces effets, ne sont cependant pas du même ordre de grandeur, le surcroît d'apports solaires est quatre fois plus important que la réduction des aperditions thermiques, l'effet général est donc significativement négatif. Cette conclusion est bien sûr à relativiser, puisque l'augmentation des apports solaires peut se gérer avec via des protections solaires. La végétalisation des bâtiments a quant à elle une influence significative et positive en termes de réduction des aperditions thermiques par les parois opaques. La végétalisation des bâtiments conduit même pour nos deux cas d'étude à un changement de comportement des parois opaques, avec l'annulation des aperditions thermiques au niveau des toits et l'apparition de faibles déperditions thermiques en façades.

Dans le Tableau 37 nous classons les variations testées en précisant leur degré d'influence, en précisant si l'effet est positif ou négatif :

- +++ : effet positif avec Δ indicateur > 50%
- ++ : effet positif avec $10\% < \Delta$ indicateur < 50%
- + : effet positif avec $5\% < \Delta$ indicateur < 10%
- --- : effet négatif avec Δ indicateur > 50%
- -- : effet négatif avec $10\% < \Delta$ indicateur < 50%
- - : effet négatif avec $5\% < \Delta$ indicateur < 10%

Potentiels	Indicateurs	Param. de conception	Hiver				Eté			
			Armstrong		Ginko		Armstrong		Ginko	
			Δ Wh/m ²	Δ %	Δ Wh/m ²	Δ %	Δ Wh/m ²	Δ %	Δ Wh/m ²	Δ %
Eclairage naturel	ecl_diffus journalier moyen sur façades /m ² de façades	↗ Albédo	222	70%	230	75%	1280	118%	1069	109%
		Végétalisation (toits et façades)								
		↗ Hauteur (+2 étages)	-12	-4%	-16	-5%	-40	-4%	-36	-4%
		Δ Orientation (-15°)	-2	-1%	4	1%	-8	-1%	-3	0%
Production EnR solaires en toiture	ecl_inc_tot journalier moyen sur toits /m ² de toits	↗ Albédo	5	0%	71	5%	26	0%	205	2%
		Végétalisation (toits et façades)								
		↗ Hauteur (+2 étages)	1	0%	1	0%	2	0%	3	0%
		Δ Orientation (-15°)	5	0%	13	1%	2	0%	19	0%
Production EnR solaires en façade	ecl_inc_tot journalier moyen sur façades /m ² de façades	↗ Albédo	222	16%	230	16%	1280	37%	1069	34%
		Végétalisation (toits et façades)								
		↗ Hauteur (+2 étages)	-69	-5%	-78	-6%	-82	-2%	-27	-1%
		Δ Orientation (-15°)	-18	-1%	19	1%	-58	-2%	-66	-2%
Chauffage passif	Apports solaires transmis (vitrage) /m ² de plancher	↗ Albédo	15	16%	18	16%				
		Végétalisation (toits et façades)								
		↗ Hauteur (+2 étages)	-5	-5%	-9	-9%				
		Δ Orientation (-15°)	-1	-1%	1	1%				
	Déperditions thermiques (vitrage) /m ² de plancher	↗ Albédo								
		Végétalisation (toits et façades)								
		↗ Hauteur (+2 étages)								
		Δ Orientation (-15°)								
	Déperditions thermiques (parois opaques) /m ² de plancher	↗ Albédo	6	10%	7	10%				
		Végétalisation (toits et façades)	-8	-10%	-8	-14%				
		↗ Hauteur (+2 étages)	-4	-7%	-8	-12%				
		Δ Orientation (-15°)	0	0%	0	0%				
Confort d'été passif	Apports solaires transmis (vitrage) /m ² de plancher	↗ Albédo					88	37%	82	34%
		Végétalisation (toits et façades)								
		↗ Hauteur (+2 étages)					-7	-3%	-9	-4%
		Δ Orientation (-15°)					-4	-2%	-5	-2%
	Aperditions thermiques (parois opaques) /m ² de plancher	↗ Albédo					-22	-96%	-25	-119%
		Végétalisation (toits et façades)					-51	Gains -> Pertes	-55	Gains -> Pertes
		↗ Hauteur (+2 étages)					-6	-13%	-8	-16%
		Δ Orientation (-15°)					-1	-3%	0	-1%
Îlot de chaleur urbain	Cumul journalier des flux convectifs (toutes surfaces) /m ² de quartier	↗ Albédo					-1307	-37%	-1274	-42%
		Végétalisation (toits et façades)					-1010	-31%	-1374	-49%
		↗ Hauteur (+2 étages)					-310	-9%	-231	-8%
		Δ Orientation (-15°)					-150	-4%	-4	0%

Tableau 36 - Effet des paramètres de conception sur les potentiels bioclimatiques à l'échelle du quartier

Potentiels	Influences			
	↗ Albedo	Végétalisation (toits et façades)	↗ Hauteur (+2 étages)	Δ Orientation (-15°)
Eclairage naturel (hiver)	+++		-	
Eclairage naturel (été)	+++			
Production d'EnR solaires en toiture (hiver)	+			
Production d'EnR solaires en toiture (été)				
Production d'EnR solaires en façades (hiver)	++		-	
Production d'EnR solaires en façades (été)	++			
Chauffage passif (apports solaires)	++		-	
Chauffage passif (déperditions thermiques)	--	++	++	
Confort d'été passif (apports solaires)	--			
Confort d'été passif (déperditions thermiques)	+++	+++	++	
Îlot de Chaleur Urbain	++	++	+	

Tableau 37 - Synthèse effet des paramètres de conception sur les potentiels bioclimatiques

- L'augmentation des albédos présente les effets les plus nombreux et les plus complexes. Elle a un effet positif très marqué sur le potentiel d'éclairage naturel. Un effet positif marqué également sur le potentiel de production d'EnR solaire en façades, sur le chauffage passif et sur l'îlot de chaleur urbain. Un effet positif mais limité sur le potentiel de production d'EnR en toiture, et ce seulement en hiver. Et enfin un effet négatif sur le potentiel de confort passif en été ; elle permet de diminuer fortement les déperditions thermiques, mais entraîne également une augmentation importante des apports solaires.
- La végétalisation des façades et des toits a un effet positif franc sur le potentiel de chauffage passif, le potentiel de confort d'été passif et le risque de contribution à l'ICU.
- L'ajout de deux étages à l'ensemble des bâtiments un effet négatif limité sur le potentiel d'éclairage naturel, sur la production d'EnR solaire en façade ainsi que sur le potentiel de chauffage passif. Il a un effet positif sur la réduction des déperditions thermiques en hiver et des déperditions thermiques en été. Il a enfin un effet positif limité sur le risque de contribution à l'ICU, du fait de l'augmentation des masques solaires.
- L'orientation de la scène urbaine à +/- 15° n'a pas d'effet significatif sur les potentiels bioclimatiques.

On remarque que les effets associés aux variations géométriques (hauteur des bâtiments et orientation) sont très limités dans les scénarios que nous avons testés. Afin d'aborder l'effet d'une différence de forme plus drastique que l'ajout de deux étages ou la rotation de 15° de la scène urbaine, comme par exemple la comparaison de deux projets d'aménagement différents, nous avons réalisé, avec la même méthode d'analyse, une comparaison entre nos deux cas d'étude (Tableau 38), pour le scénario MIA. De même que précédemment, une synthèse de l'amplitude des effets sur les potentiels bioclimatiques est proposée Tableau 39.

Dans le Tableau 38 nous indiquons également les résultats obtenus pour nos deux cas d'étude, et pas seulement les différences entre les deux. Ceci nous permet notamment de discuter l'importance relative des différents indicateurs retenus pour le potentiel de chauffage passif et le potentiel de confort d'été passif. On constate en effet que les apports solaires au solstice d'hiver sont légèrement supérieurs aux déperditions thermiques au travers des vitrages (dans l'hypothèse de vitrages non protégés la nuit, pas de volet). Ces deux flux sont de l'ordre de 100 Wh/m² de plancher. Les déperditions thermiques par les parois opaques s'élèvent à ~65 Wh/m² de plancher. Aucun de ces trois phénomènes n'est donc négligeable. En été les apports solaires transmis par m² de plancher sont six fois supérieurs aux déperditions thermiques via les parois opaques. Les apports solaires transmis sont

donc le terme prépondérant pour l'étude du potentiel de confort passif en été. Ceci ne prenant bien sûr pas en compte les éventuelles protections solaires.

Potentiels	Indicateurs	MIA							
		hiver				été			
		Armstrong	Ginko	Δ Wh/m ²	Δ %	Armstrong	Ginko	Δ Wh/m ²	Δ %
Eclairage naturel	éclairage diffus journalier moyen sur façades Wh/m ² de façades	334	336	3	1%	1385	1199	-186	-13%
Production EnR solaires en toiture	flux solaire global incident journalier moyen sur toits Wh/m ² de toits	1377	1342	-35	-3%	8788	8659	-129	-1%
Production EnR solaires en façade	flux solaire global incident moyen sur façades Wh/m ² de façades	1390	1465	75	5%	3810	3325	-485	-13%
Chauffage passif	Apports solaires transmis (vitrage) Wh/m ² de plancher	96	113	17	18%				
	Déperditions thermiques (vitrage) Wh/m ² de plancher	90	100	10	12%				
	Déperditions thermiques (parois opaques) Wh/m ² de plancher	60	69	10	16%				
Confort d'été passif	Apports solaires transmis (vitrage) Wh/m ² de plancher					263	256	-7	-3%
	Aperditions thermiques (parois opaques) Wh/m ² de plancher					43	45	2	4%
Îlot de chaleur urbain	Cumul journalier des flux convectifs (toutes surfaces) Wh/m ² de quartier					3252	2787	-465	-14%

Tableau 38 – Comparaison des potentiels bioclimatiques pour Armstrong et Ginko (scénario MIA)

Potentiels	Influence
	Forme différente ARM > GK
Eclairage naturel (hiver)	
Eclairage naturel (été)	--
Production d'EnR solaires en toiture (hiver)	
Production d'EnR solaires en toiture (été)	
Production d'EnR solaires en façades (hiver)	+
Production d'EnR solaires en façades (été)	--
Chauffage passif (apports solaires)	++
Chauffage passif (déperditions vitrage)	--
Chauffage passif (déperdition sparois opaques)	--
Confort d'été passif (apports solaires)	
Confort d'été passif (aperditions parois opaques)	
Îlot de Chaleur Urbain	++

Tableau 39 – Comparaison des potentiels bioclimatiques pour les scénarios ARM_MIA_00_Et0 et GK_MIA_00_Et0

Il est intéressant de noter que ce changement complet de forme urbaine a des effets relativement limités sur les différents potentiels bioclimatiques abordés par le prisme des indicateurs que nous avons sélectionnés. Et notamment les effets sont moins marqués que ceux constatés dans le cadre de modifications d'albédo ou de végétalisation à forme urbaine constante.

Ceci pose la question de la pertinence du choix d'indicateurs de potentiels bioclimatiques moyennés sur l'ensemble des façades. D'autant plus que la conception d'un bâtiment propose souvent une grande asymétrie en termes d'affectation des espaces attenants aux différentes façades en fonction de leur orientation. Ces différents espaces sont conçus pour avoir des modes de fonctionnement très différents ; typiquement pour un climat tempéré, on a un fort taux de vitrage au sud pour maximiser les apports solaire d'hiver, associé à des protections solaires pour éviter la surchauffe le reste de l'année, ainsi qu'un plus faible taux de vitrage au nord, associé à une isolation renforcée pour limiter

les déperditions thermiques. Nous avons recalculé les indicateurs associés aux potentiels de chauffage passif (apports solaires transmis et déperditions thermiques) et au potentiel de confort d'été passif (apports solaires transmis) pour les façades les plus ensoleillées, que nous notons « FaçadesMAX », et sur les façades les moins ensoleillées que nous notons « FaçadesMIN ».

- Pour Armstrong en hiver : FaçadesMIN = Nord-Est, et FaçadesMAX = Sud-Ouest
- Pour Armstrong en été : FaçadesMIN = Nord-Est, et FaçadesMAX = Sud-Est
- Pour Ginko en hiver : FaçadesMIN = Nord, et FaçadesMAX = Sud
- Pour Ginko en été : FaçadesMIN = Nord, et FaçadesMAX = Est

Les résultats sont présentés dans les Tableau 40 et Tableau 41. S'agissant des apports solaires transmis en hiver, lorsque l'on ne considère que les façades les plus ensoleillées, l'augmentation de l'albédo a relativement moins d'influence, l'effet de l'ajout de deux étages a très peu d'influence, l'effet de la modification de l'orientation de la scène urbaine (-15°) acquiert une influence significative pour Armstrong, alors qu'elle n'a pas d'influence significative lorsque l'on considère les apports solaires en moyenne sur les façades. Pour le cas Ginko, par contre, cette influence reste limitée.

Toujours en hiver, s'agissant des déperditions thermiques par les façades les moins ensoleillées, l'augmentation de l'albédo n'a plus d'influence significative, contrairement au cas où l'on considère l'ensemble des façades. L'ajout de deux étages acquiert par contre une influence significative, mais pour le seul cas Ginko.

Enfin, pour ce qui est des apports solaires d'été, on constate que lorsque l'on se focalise sur les façades les plus ensoleillées, l'orientation de la scène urbaine, acquiert une influence significative pour le cas d'étude Armstrong. Cette variation d'orientation a même un effet significatif négatif, alors que considérée sur l'ensemble des façades, elle avait un effet très faible mais positif.

Ces indicateurs qui prennent en compte les orientations de façades semblent comme nous l'avions anticipé capables de discriminer des projets plus finement notamment s'agissant des variations géométriques. Et il est intéressant de constater que les résultats, contrairement aux résultats moyens sur l'ensemble des orientations de façades sont très différents entre nos deux cas d'étude. La comparaison entre les scénarios ARM_MIA_OO_Et0 et GK_MLA_OO_Et0 (Tableau 41), illustre parfaitement ce point.

Potentiels	Indicateurs	Param. de conception	Hiver				Eté			
			Armstrong		Ginko		Armstrong		Ginko	
			Δ Wh/m ²	Δ %						
Chauffage passif	Apports solaires transmis (vitrage FaçadesMAX) /m ² de plancher	↗ Albédo	4	9%	5	7%				
		↗ Végétalisation (toits et façades)								
		↗ Hauteur (+2 étages)	-2	-5%	-7	-9%				
	Déperditions thermiques (parois opaques FaçadesMIN) /m ² de plancher	↗ Orientation (-15°)	8	18%	3	4%				
		↗ Albédo	0,1	1%	0,1	1%				
		↗ Végétalisation (toits et façades)	-2	-18%	-3	-18%				
Confort d'été passif	Apports solaires transmis (vitrage FaçadesMAX) /m ² de plancher	↗ Hauteur (+2 étages)	0,1	1%	-2	-13%	23	31%	15	22%
		↗ Orientation (-15°)	0,1	1%	0	0%				
		↗ Albédo								
	Apports solaires transmis (vitrage FaçadesMIN) /m ² de plancher	↗ Végétalisation (toits et façades)								
		↗ Hauteur (+2 étages)					-2	-3%	-0,5	-1%
		↗ Orientation (-15°)					4	6%	-2	-2%

Tableau 40 - Effet des paramètres de conception sur les apports solaires des façades les plus ensoleillées et les déperditions thermiques des façades les moins ensoleillées

Potentiels	Indicateurs	MIA							
		hiver				été			
		Armstrong	Ginko	Δ Wh/m ²	Δ %	Armstrong	Ginko	Δ Wh/m ²	Δ %
Chauffage passif	Apports solaires transmis (vitrage FaçadesMAX) Wh/m ² de plancher	43	75	32	74%				
	Déperditions thermiques (parois opaques FaçadesMIN) Wh/m ² de plancher	11	15	4	37%				
Confort d'été passif	Apports solaires transmis (vitrage FaçadesMAX) Wh/m ² de plancher					81	73	-8	-10%

Tableau 41 - Apports solaires sur les façades les plus ensoleillées et déperditions thermiques des façades les moins ensoleillées pour les cas d'études Armstrong et Ginko, scénario MIA_OO_Et0

5.4. CONCLUSIONS

Nous avons dans ce chapitre étudié les potentiels bioclimatiques de deux cas d'études à l'aide d'indicateurs morpho-climatiques nécessitant des simulations soit solaires soit thermo-radiatives. Cette étude détaillée de la manière dont ces potentiels sont affectés par différents types de variations de la morphologie urbaine (forme et type de surfaces) nous a permis de développer une compréhension plus fine de l'influence de différents paramètres de la morphologie urbaine sur le bilan énergétique d'une surface urbaine, et en particulier sur les apports solaires et les déperditions ou apertions thermiques des bâtiments.

Pour la suite de nos travaux, nous nous concentrons sur les thématiques du chauffage passif et du confort d'été passif, et nous proposons le développement d'une approche simplifiée pour l'évaluation de ces potentiels à l'échelle du quartier (Chapitre 6).

Notre état de l'art (Chapitre 3), ainsi que l'étude présentée dans ce chapitre auront permis de mettre en évidence un certain nombre d'éléments qui éclairent le développement de cette approche d'évaluation des besoins thermiques, et notamment :

- En hiver, dans le cas de bâtiments correctement isolés, les déperditions thermiques au travers des parois opaques, les déperditions thermiques au travers des vitrages et les apports solaires sont du même ordre de grandeur en cumul journalier (rapportés au m² de plancher). Ces trois dimensions doivent donc être considérées, et l'on ne peut pas traiter uniquement des apports solaires.
- Les inter-réflexions peuvent être du même ordre de grandeur que le flux solaire diffus et doivent donc être considérées du point de vue des apports solaires.
- En matière d'échanges GLO, les modes de calcul des échanges GLO avec le ciel et avec la scène urbaine influent fortement sur l'évaluation des besoins énergétiques des bâtiments. La prise en compte des échanges GLO au sein de la scène urbaine induit une diminution significative des besoins thermiques.
- La prise en compte précise du vent a relativement peu d'influence sur les potentiels de chauffage passif et de confort d'été passif tels que nous les avons définis (sur la seule base des apports solaires et des déperditions ou apertions thermiques).
- Les variations d'albédo influencent grandement les apertions thermiques en été (toits et façades) ainsi que apports solaires sur les façades en été et en hiver. Les variations d'albédo doivent être prises en compte.
- La végétalisation des toits, des façades, mais aussi des surfaces au sol, influence significativement les températures de surfaces et les flux convectifs et donc l'îlot de chaleur

urbain, mais aussi sur les déperditions ou apercditions thermiques des bâtiments. Les stratégies de végétalisation doivent être prises en compte.

- Le fait de travailler avec des indicateurs moyennés sur l'ensemble des orientations de façades ne permet pas de discriminer efficacement des formes urbaines même assez différentes. Il apparaît nécessaire de pouvoir discriminer les façades par orientation.
- S'agissant du flux conductif, nous avons constaté qu'il est toujours un ordre de grandeur plus faible que les flux externes (flux solaire absorbé, flux GLO et flux convectif). Ses variations sont quant à elles un à deux ordres de grandeur plus faibles que les variations des flux externes. L'équilibre à la surface extérieure des bâtiments est donc principalement un équilibre entre le flux solaire absorbé, le flux convectif et le flux GLO total. Il n'apparaît donc pas envisageable de développer une approche d'évaluation des potentiels thermiques des bâtiments sur la base d'évaluations approchées des flux externes.

Chapitre 6. Modélisation du potentiel de chauffage passif et du potentiel de confort d'été passif à l'échelle du quartier

6.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons la méthode que nous avons développée pour l'évaluation du potentiel de chauffage passif et du potentiel de confort d'été passif à l'échelle d'un quartier, et applicable en phase amont de conception d'un projet d'aménagement, c'est-à-dire sur la base des informations disponibles au stade d'établissement du plan masse.

Dans notre approche, les indicateurs choisis pour représenter le potentiel de chauffage passif et le risque de surchauffe estivale sont respectivement les besoins annuels de chaud et de froid des bâtiments.

Cette méthode d'évaluation des besoins de chaud et de froid d'un quartier consiste en deux grandes étapes (Figure 66). Dans un premier temps, nous proposons de transformer la modélisation 3D du quartier à évaluer en une forme urbaine générique (réseau régulier de bâtiments de type parallélépipèdes rectangles de hauteur constante) équivalente du point de vue des besoins thermiques. Dans un second temps, nous évaluons les besoins de chaud et de froid du quartier générique équivalent grâce à des métamodèles du moteur de simulation thermique dynamique (STD) EnergyPlus (Crawley et al. 2001), que nous avons développés pour ce type de forme urbaine.

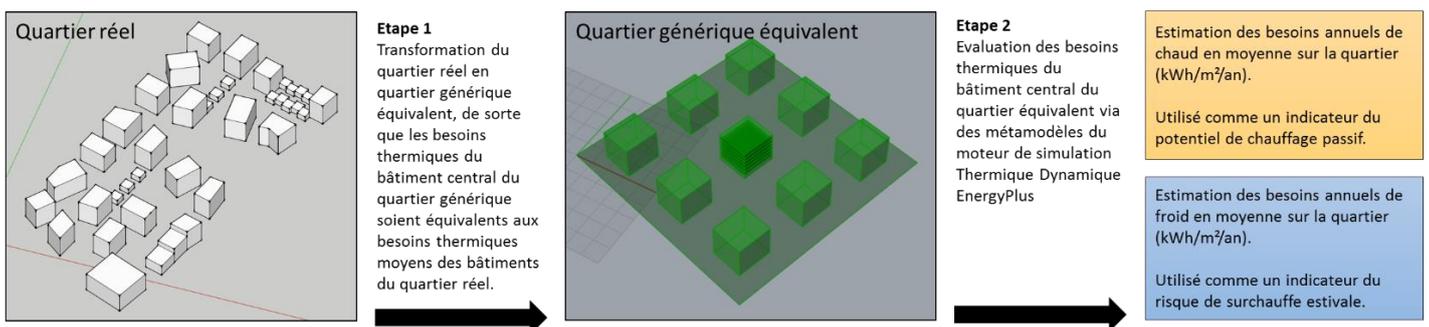


Figure 66 –Approche de modélisation des besoins thermiques des bâtiments à l'échelle du quartier

Nous commençons par détailler ces deux étapes, puis proposons une validation et discussion de la méthode via son application sur un corpus de 45 cas d'étude (9 quartiers réels et 36 variations obtenues à partir de 6 formes urbaines génériques). Les cas d'étude sont évalués d'une part avec des simulations thermiques dynamiques sur les géométries réelles, et d'autre part via notre approche simplifiée.

6.2. DEFINITION D'UN QUARTIER GÉNÉRIQUE ÉQUIVALENT DU POINT DE VUE DES BESOINS THERMIQUES

Nos travaux concernant la transformation d'un quartier réel en quartier générique équivalent du point de vue des besoins thermiques, sont une adaptation des travaux de Rodríguez-Álvarez (2016). L'auteur a développé UEIB (Urban Energy Index for Buildings) une méthodologie pour l'évaluation des effets de la forme urbaine sur les besoins énergétiques des bâtiments. La première étape de son approche, tout comme la nôtre, consiste à transformer un échantillon urbain en une forme urbaine générique équivalente. L'auteur suggère que l'équivalence des besoins thermiques entre la forme initiale et la forme générique équivalente est assurée si l'hypothèse suivante est vérifiée : "Les charges moyennes

de chauffage, d'éclairage et de refroidissement de tous les bâtiments d'une zone urbaine sont analogues aux charges moyennes d'un réseaux régulier de bâtiments, à condition que les paramètres spatiaux clés (Tableau 42) soient conservés.»

Cette hypothèse se traduit notamment par la conservation du Coefficient d'Emprise au Sol (CES), du Coefficient d'Occupation des Sols (COS), de la compacité et de l'orientation des bâtiments.

Summary of the key urban parameters that need to be retained in the notional grid for a meaningful energy assessment.

Parameter	Interpretation	Units	
Area	Gross area of the urban sample	A	m ²
Ground Floor Area	Built area on the ground floor	GFA	m ² /m ²
Total Floor Area	Total built-up area	TFA	m ² /m ²
Floor Space Index	It represents the gross built up area per land unit for all uses and floors above ground level. It is measured in m ² /m ² and it is a typical standard in planning documents ($FSI = TFA/A$)	FSI	m ² /m ²
Ground Space Index	It indicates the proportion of land that is covered by buildings ($GSI = GFA/A$)	GSI	m ² /m ²
Compactness Ratio	Although it is not a typical planning standard, it is relevant to the energy performance. It is defined as the proportion of exposed envelope area (roof and external walls) to the floor area ($Comp = Env/TFA$)	Comp	m ² /m ²
Perimeter	Sum of the perimeter of all buildings	P	m
Envelope area	Ratio between the perimeter on the main orientation and its orthogonal ($Pn-s/Pe-w$, where $Pn-s$ = perimeter on main orientation; $Pe-w$ = perimeter on secondary orientation)	Env	m ²
Orientation ratio	Ratio between the perimeter on the main orientation and the perimeter on its orthogonal ($Pn-s/Pe-w$, where $Pn-s$ = perimeter on main orientation; $Pe-w$ = perimeter on secondary orientation)	Or	
Obstruction angle	Average obstruction angle in the two main axes, as detailed in Section 2.2.1	θ	Degrees
Volume	Total built-up volume	V	m ³
Building height	Weighted average building height in the study area	h	m
Number of floors	Average number of floors in the study area	f	
Glazing ratio	Average wall to window ratio in all the elevations of the study area	Gr	%
Construction type	A categorical definition of the typical building construction, especially regarding thermal transmittance	Ct	

Tableau 42 - paramètres urbains clés, dont la conservation entre la forme urbaine originale et son quartier générique équivalent assure l'équivalence des besoins thermiques et lumineux (Rodríguez-Álvarez 2016)

Nous définissons le quartier générique équivalent par 7 paramètres : l'orientation, la hauteur moyenne des bâtiments, la hauteur des niveaux, les dimensions des bâtiments selon les deux axes principaux (perpendiculaires), les largeurs de rue selon les deux axes principaux.

Pour le calcul de ces paramètres du quartier générique équivalent, nous avons implémenté les formules proposées par Rodríguez-Álvarez (2016), en y apportant les modifications suivantes :

- Adaptation pour rendre possible l'application sur des échantillons urbains rectangulaires. La méthode initiale n'étant applicable qu'à des échantillons urbains carrés.
- Adaptation pour permettre l'évaluation d'échantillons urbains présentant un nombre de bâtiments différent selon les deux axes. La méthode initiale faisant l'hypothèse forte d'une iso-densité en nombre selon les deux axes.
- Adaptation pour permettre la prise en compte de la hauteur des niveaux lorsque celle-ci est connue.

Les différentes étapes de notre méthode de calcul sont présentées dans le Tableau 43. Les notations utilisées sont les suivantes :

- SP : Surface de plancher totale (m²). Il s'agit de la somme des surfaces de plancher de l'ensemble des bâtiments.
- ES : Emprise au sol des bâtiments (m²). Il s'agit de la somme des emprises au sol de l'ensemble des bâtiments.
- b_1 : longueur des bâtiments selon l'axe 1 (m)
- b_2 : longueur des bâtiments selon l'axe 2 (m)
- N : nombre total de bâtiments
- N_1 : nombre de bâtiments selon l'axe 1
- N_2 : nombre de bâtiments selon l'axe 2
- P : Périmètre total (m). Il s'agit de la somme des périmètres de l'emprise au sol de tous les bâtiments.

- P_1 : périmètre selon l'axe 1 (m). Il s'agit de la somme des segments des périmètres de l'emprise au sol de tous les bâtiments dont l'orientation est plus proche de l'orientation de l'axe 1 que de celle de l'axe 2
- P_2 : périmètre selon l'axe 2 (m). Il s'agit de la somme des segments des périmètres de l'emprise au sol de tous les bâtiments dont l'orientation est plus proche de l'orientation de l'axe 2 que de celle de l'axe 1
- a_1 : dimension de l'échantillon selon l'axe 1 (m)
- a_2 : dimension de l'échantillon selon l'axe 2 (m)
- d_1 : distance entre les bâtiments selon l'axe 1 (m). Il s'agit de la largeur des rues orientées selon l'axe 2
- d_2 : distance entre les bâtiments selon l'axe 2 (m). Il s'agit de la largeur des rues orientées selon l'axe 1
- θ_1 : angle d'obstruction selon l'axe 1
- θ_2 : angle d'obstruction selon l'axe 2
- h : hauteur moyenne des bâtiments (m)

Etape 1 : Calcul de la longueur du bloc selon l'axe 1 (b_1)

Définition de la surface de plancher totale	$SP = b_1 * b_2 * N$	eq. 33
Définition du périmètre selon l'axe 2	$P_2 = 2 * b_2 * N$	eq. 34
eq. 33 & eq. 34 →	$b_1 = \frac{2 * ES}{P_2}$	eq. 35
Définition du périmètre	$P = P_1 + P_2$	eq. 36
Définition du ratio d'orientation	$O_r = \frac{P_1}{P_2}$	eq. 37
eq. 36 & eq. 37 →	$P_2 = \frac{P}{1 + O_r}$	eq. 38
eq. 35 & eq. 38 →	$b_1 = \frac{2 * ES * (1 + O_r)}{P}$	eq. 39

Etape 2 : Calcul de la longueur du bloc selon l'axe 2 (b_2)

	$P_1 = 2 * b_1 * N$	eq. 40
eq. 34 & eq. 37 & eq. 40 →	$O_r = \frac{b_1}{b_2}$	eq. 41
eq. 39 & eq. 41 →	$b_2 = \frac{2 * ES * (1 + O_r)}{P * O_r}$	eq. 42

Etape 3 : Calcul du nombre total de blocs (N)

eq. 33 & eq. 39 & eq. 42	$N = \frac{P^2 * O_r}{4 * ES * (1 + O_r)^2}$	eq. 43
--------------------------	--	--------

Etape 4 : Calcul du nombre de blocs selon les deux axes (N_1 & N_2)

	$N = N_1 * N_2$	eq. 44
Hypothèse : la densité de bâtiments (en nombre est identique suivant les deux axes)	$\frac{N_1}{N_2} = \frac{a_1}{a_2}$	eq. 45
eq. 43 & eq. 45 →	$N_1 = \sqrt{\frac{a_1 * P^2 * O_r}{a_2 * 4 * ES * (1 + O_r)^2}}$	eq. 46

	$N_2 = \frac{N}{N_1}$	eq. 47
Etape 5 : Calcul des largeurs de rues (d_1 & d_2)		
	$d_1 = \frac{a_1 - N_1 * b_1}{N_1}$	eq. 48
	$d_2 = \frac{a_2 - N_2 * b_2}{N_2}$	eq. 49
Etape 6 : Calcul des angles d'obstruction (θ_1 & θ_2)		
	$\theta_1 = \arctan\left(\frac{h}{d_1}\right)$	eq. 50
	$\theta_2 = \arctan\left(\frac{h}{d_2}\right)$	eq. 51

Tableau 43 - Les étapes de la méthode de calcul des paramètres du quartier générique équivalent

Rodríguez-Álvarez (2016) considère une maille carrée et un même nombre de blocs selon les deux axes. On peut également facilement considérer une maille rectangulaire, si l'on conserve l'hypothèse d'une densité de bâtiments identique selon les deux axes (eq. 45).

La méthode de calcul détaillée ci-dessus est applicable à des échantillons urbains rectangulaires. Cependant, l'hypothèse d'une iso-densité de bâtiments (en nombre) selon les deux axes, nous semble trop contraignante, et ce d'autant plus que l'on va vouloir appliquer la méthode à des échantillons urbains de petite taille (les effets de moyenne sont moins forts). Nous proposons donc une double-stratégie pour la suite de nos travaux :

- Lorsque l'analyse visuelle de l'échantillon urbain ne permet pas de déterminer le nombre moyen de bâtiments selon chaque axe, nous appliquons telles quelles les formules ci-dessus
- Lorsqu'il est possible de déterminer visuellement le nombre moyen de bâtiments selon chaque axe, nous remplaçons l'équation eq. 45 par le ratio N_1/N_2 ainsi évalué

La dernière adaptation que nous proposons consiste à prendre en compte la hauteur d'un niveau lorsque celle-ci est connue. Dans la méthode originale, seule la hauteur moyenne des bâtiments est considérée, le nombre de niveaux et la hauteur de niveau ne rentrent pas en compte. Or, pour la seconde étape de notre approche, c'est-à-dire l'application de métamodèle de simulation thermique dynamique au quartier générique équivalent, nous avons besoin de découper les bâtiments en niveaux. Il nous faut donc connaître le nombre de niveaux et la hauteur des niveaux. Connaissant la hauteur de niveau, nous définissons le nombre de niveaux comme le ratio de la hauteur moyenne sur la hauteur de niveau. Le nombre de niveaux ainsi calculé n'est généralement pas un entier. Nous proposons dans ce cas de l'arrondir à l'entier le plus proche, et d'ajuster à posteriori la largeur des rues selon les deux axes de manière à conserver les angles d'obstructions moyens selon la méthode ci-dessous (eq. 52 à eq. 55) :

$$\tan \theta_{iqefinal} = \frac{h_{qefinal}}{d_{iqefinal}} = \frac{nbr_{niveau} * h_{niveau}}{d_{iqefinal}} \quad eq. 52$$

$$\tan \theta_{iqeinitial} = \frac{h_{qeinitial}}{d_{iqeinitial}} \quad eq. 53$$

$$\tan \theta_{iqefinal} = \tan \theta_{iqeinitial} \quad eq. 54$$

$$d_{iqe_{final}} = d_{iqe_{initial}} * \frac{nbr_{niveau} * h_{niveau}}{h_{qe_{initial}}} \quad eq. 55$$

avec :

- $\theta_{iqe_{initial}}$: l'angle d'obstruction selon l'axe i calculé avec la méthode initiale
- $h_{qe_{initial}}$: la hauteur moyenne des bâtiments calculée avec la méthode initiale
- $d_{iqe_{initial}}$: la distance entre les bâtiments selon l'axe i calculé avec la méthode initiale
- $d_{iqe_{final}}$: la distance entre les bâtiments selon l'axe i pour l'application des métamodèles
- nbr_{niveau} : le nombre de niveaux choisi pour l'application des métamodèles
- h_{niveau} : la hauteur de niveau connue pour le quartier réel

6.3. CONSTRUCTION DE METAMODELES POUR L'ÉVALUATION DES BESOINS DE CHAUD ET DE FROID D'UN QUARTIER GÉNÉRIQUE DE TYPE « BLOC »

Notre état de l'art (Chapitre 3) et notre étude détaillée de l'influence de la forme urbaine sur les potentiels bioclimatiques d'un quartier (Chapitre 5) ont mis entre autre en évidence la pertinence de de l'analyse morphologique pour expliquer les besoins thermiques des bâtiments à l'échelle du quartier, ce qui justifie le recours à la réduction d'une forme urbaine réelle en forme urbaine générique. Cependant nous avons également mis en évidence la grande difficulté à établir des lois empiriques entre paramètres morphologiques et besoins thermiques par exemple. Enfin, nous avons montré qu'il n'est pas possible d'obtenir une information pertinente sur les besoins thermiques des bâtiments à partir de la seule étude des flux externes au niveau de l'enveloppe des bâtiments. L'ensemble de ces éléments nous pousse à considérer l'usage d'un moteur de simulation thermique dynamique pour l'évaluation des besoins thermiques de nos quartiers génériques équivalents.

Cependant, pour des raisons d'intégration à l'outil NEST et d'opérationnalité en phase amont de conception nous souhaitons nous affranchir in fine du moteur de STD. La réduction de la complexité de la forme urbaine, permet d'envisager le développement de métamodèles d'EnergyPlus, pour l'évaluation des besoins de chaud et de froid d'un quartier générique constitué d'un réseau régulier de bâtiments de type parallélépipède rectangle (quartier générique de type « bloc »).

Dans un premier temps, nous présentons ce que sont les métamodèles, ainsi qu'une revue de la littérature en termes d'emploi de métamodèles en substitution de modèles de simulation thermique dynamique de bâtiments. Dans un second temps nous présentons plus en détail la méthode de création de métamodèles que nous avons retenue pour nos travaux : les métamodèles par polynômes du chaos. Dans un troisième temps, nous présentons la démarche adoptée pour la production de nos métamodèles. Enfin nous détaillons les caractéristiques des métamodèles obtenus.

6.3.1. L'utilisation de métamodèles pour l'évaluation des besoins énergétiques des bâtiments

Un métamodèle est un modèle de substitution d'un modèle numérique complexe et dont la vitesse d'exécution est beaucoup plus rapide. Il s'agit d'une fonction mathématique qui permet d'approximer et de prédire les réponses du modèle de référence en bénéficiant à la fois de la rapidité de calcul des modèles simplifiés et d'une précision proche de celle obtenue avec des modèles détaillés.

Soit un modèle détaillé de simulation thermique dynamique, f , ayant n variables de décisions réunies dans un vecteur d'entrée $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, et une grandeur d'intérêt Y correspondant au résultat

d'évaluation du modèle f selon l'équation (eq. 56), pour chaque grandeur d'intérêt Y , un métamodèle \mathbf{M} permet d'obtenir une approximation \tilde{Y} (eq. 57) de Y .

$$Y = f(\vec{X}) \quad \text{eq. 56}$$

$$\tilde{Y} = \mathbf{M}(\vec{X}) \quad \text{eq. 57}$$

avec $Y \sim \tilde{Y}$

Le métamodèle est construit à partir d'un plan d'expérience réalisé sur le modèle initial. Cet échantillon est scindé en deux sous-échantillons, l'un constitue la base d'apprentissage, sur laquelle le métamodèle est construit, l'autre constitue la base de validation sur laquelle le métamodèle est testé. L'établissement d'un métamodèle nécessite donc de passer par trois étapes successives (Nguyen et al. 2014):

1. Génération d'un échantillon de vecteurs d'entrée \vec{X} et calcul des grandeurs d'intérêt Y correspondantes. Cet échantillon constitue la base de données nécessaire à la construction du métamodèle et à sa validation.
2. Construction du métamodèle \mathbf{M} à partir d'une partie de l'échantillon générée à l'étape 1 avec une méthode appropriée
3. Validation du métamodèle obtenu à partir du reste de l'échantillon non utilisé pour la construction du métamodèle.

Il existe un grand nombre de méthode de construction de métamodèles dans la littérature. Sans prétendre à l'exhaustivité, nous pouvons citer les réseaux de neurones, les interpolateurs polynomiaux, le processus gaussien (krigeage), les polynômes du chaos ou encore les machines à support de vecteur.

Dans la littérature, l'emploi de métamodèles en substitution de modèles de simulation thermique dynamique de bâtiments s'est intensifié au cours de ces dix dernières années. Pour une revue complète le lecteur peut se référer à (Zhao & Magoulès 2012; Fouquier et al. 2013; Van Gelder et al. 2014; Armand Decker 2015). Les exemples sélectionnés ci-dessous illustrent la variété des méthodes de construction de métamodèles mentionnées ci-dessus et qui ont déjà été appliquées à la modélisation thermique des bâtiments.

Chlela et al. (2009) utilisent une approche par plans d'expériences pour déterminer les coefficients de polynômes quadratiques pour l'évaluation des performances énergétiques des bâtiments. Le couplage de plusieurs plans d'expérience permet d'augmenter significativement la précision des métamodèles et nécessite moins de 400 simulations pour 13 variables, chacune pouvant prendre 5 valeurs discrètes. L'erreur relative maximum obtenue avec le meilleur couplage dépend du climat considéré et est de 2,02 kWh/(m².an) pour les besoins de rafraîchissement et de 0,85 kWh/(m².an) pour les besoins de chauffage.

Afin de modéliser la consommation énergétique et l'inconfort thermique d'un bâtiment résidentiel, Magnier & Haghghat (2010) ont généré cinq métamodèles à partir d'un échantillon de 450 simulations réalisées sous TRNSYS et de 12 variables de décisions. Grâce à l'utilisation des métamodèles, les critères de performance ont été modélisés par des fonctions analytiques rapides à calculer, ce qui permet ensuite l'optimisation du bâtiment par la minimisation simultanée de la consommation énergétique et l'inconfort thermique à partir d'un algorithme génétique. La génération de l'échantillon a nécessité trois semaines. Si l'algorithme génétique avait été directement couplé avec le modèle

numérique TRNSYS, les auteurs estiment qu'une dizaine d'années auraient été nécessaires pour finaliser le processus d'optimisation.

Eisenhower et al. (2012) ont utilisé la méthode des SVM (*Support Vector Machine*) pour générer plusieurs métamodèles correspondant à un modèle de bâtiment EnergyPlus constitué de 30 zones thermiques et en considérant plus de 1000 variables de décision. L'échantillon utilisé pour le calcul des métamodèles était composé de 5000 solutions dont la simulation a été parallélisée sur une ferme de calcul constituée de 184 cœurs Linux.

Merheb (2013) et Rabouille (2014) ont généré des métamodèles à partir d'une décomposition par polynômes du chaos. Afin d'analyser la propagation d'incertitude sur les consommations de chauffage et l'inconfort thermique estival estimés sous EnergyPlus, Merheb (2013) a réalisé des métamodèles à partir de 16 paramètres incertains. Tandis que le modèle principal nécessite 200 secondes pour évaluer les besoins de chauffage, l'utilisation d'un métamodèle permet d'évaluer 2056 solutions en une seconde. Un échantillon de 2000 simulations a été nécessaire pour calculer un polynôme quadratique correspondant aux besoins de chauffage. L'erreur relative maximum obtenue était alors de 0,22 kWh/(m².an). Rabouille (2014) a utilisé cette même technique de génération de métamodèle pour étudier la réhabilitation de bâtiments en considérant huit variables de conception.

Chen et al. (2016) ont développé des métamodèles d'un bâtiment générique modélisé sous EnergyPlus pour l'analyse de sensibilité et la prédiction de la performance des bâtiments résidentiels passifs de grande hauteur à Hong-Kong. Les paramètres incertains sont la géométrie du bâtiment, son agencement intérieur, les propriétés thermo-physiques de l'enveloppe, et le taux d'infiltration. Les sorties sont des indices de performance liés à l'éclairage naturel, la ventilation naturelle et le confort thermique. Les auteurs ont testé deux méthodes de construction de métamodèles; la régression linéaire multiple (*multiple linear regression*), et MARS (*Multivariate Adaptive Regression Spline*). Les métamodèles obtenus par la méthode MARS s'avèrent être les plus performants.

Melo et al. (2016) présentent le métamodèle qui est utilisé au Brésil pour la certification des bâtiments résidentiels naturellement ventilés. Il est basé sur une méthode de régression linéaire multiple. Les auteurs comparent ce métamodèle pour la prédiction des besoins thermiques à un autre métamodèle construit par une méthode de type ANN (*Artificial Neural Network*) et démontrent que le second métamodèle améliore la prédiction.

Hester et al. (2016) construisent un métamodèle pour l'évaluation des consommations d'énergie annuelles des maisons individuelles à Chicago. L'objectif final étant de proposer aux architectes un outil d'aide à la conception utilisable dès l'esquisse. Les auteurs testent plusieurs méthodes de construction de métamodèles de type régression linéaire dans le but de comparer leurs performances. Ces métamodèles sont établis sur un échantillon de 2000 simulations de besoins thermiques réalisées avec EnergyPlus. Les paramètres d'entrée sont au nombre de 17, parmi lesquels, la surface, la forme, le nombre d'étages, l'orientation, le niveau d'isolation, le taux de vitrage et le choix des systèmes. Nombre de ces paramètres n'étant pas connus, ou étant mal connus en phase esquisse, les auteurs utilisent ces métamodèles pour étudier les implications liées à l'évaluation des consommations d'énergie d'un bâtiment lorsque seules les données relatives à la phase amont de conception sont connues. Ils démontrent la capacité de cette approche de métamodélisation à identifier les alternatives les plus favorables même lorsque les paramètres d'entrée ne sont connus que de manière qualitative (bon, moyen ou mauvais).

Il est à noter que de nombreuses études à l'échelle du bâtiment font appel à la construction de métamodèles dans l'objectif de disposer de modèles alternatifs suffisamment légers pour être utilisés dans des processus d'optimisation. Même si cette application est la plus fréquente, certaines études

ont recours aux métamodèles pour d'autres raisons, que ce soit pour faire de l'analyse de sensibilité, ou pour proposer un outil d'aide à la conception en phase amont des projets de construction.

Au-delà de ces applications à l'échelle du bâtiment, il existe à notre connaissance très peu d'applications des techniques de métamodélisation pour l'évaluation des performances d'un quartier.

Martins A.L. et al. (2014) utilisent un plan d'expérience pour réaliser sur un bloc de bâtiments, une analyse de sensibilité des niveaux d'irradiation solaire et d'éclairage lumineux à différents paramètres de la morphologie urbaine (CES, COS, hauteur moyenne des bâtiments). Les auteurs poursuivent par une optimisation de la forme urbaine basée sur l'utilisation d'algorithmes génétiques, mais cette optimisation ne fait pas appel au modèle empirique développé dans le cadre de l'analyse de sensibilité. Elle fait directement appel à un code de calcul SRA (Simplified Radiosity Algorithm).

Nault et al. (2017) proposent une approche différente, qui repose sur l'utilisation d'une combinaison de paramètres morphologiques, de paramètres d'irradiation solaire et d'éclairage lumineux (obtenus par simulation) comme entrées de métamodèles pour la prédiction de la performance d'un quartier en termes de besoins thermiques et d'éclairage naturel. Les auteurs construisent deux types de métamodèles pour chaque critère de performance : par régression linéaire multiple et par Processus Gaussien. L'objectif principal de cette étude est le même que le nôtre, c'est-à-dire étudier la faisabilité et la pertinence de recourir à des métamodèles pour l'évaluation des performances d'un quartier en phase amont de conception. Les auteurs construisent leurs métamodèles à partir d'un échantillon de simulations (besoins thermiques et autonomie lumineuse) réalisées sur des variations paramétriques appliquées aléatoirement à 7 formes urbaines de base supposées représentatives d'un grand nombre de configurations urbaines réelles. Ces métamodèles sont ensuite testés sur des projets d'aménagement (30 cas d'étude) issus d'un workshop réalisé avec des architectes-urbanistes. Le meilleur métamodèle obtenu pour l'évaluation des besoins thermiques induit une erreur de prédiction inférieure à 10% dans 87% des cas. Et le meilleur métamodèle obtenu pour l'évaluation de l'autonomie lumineuse induit une erreur de prédiction inférieure à 10% dans 60% des cas. Les auteurs concluent que les deux méthodes de construction de métamodèles offrent des perspectives intéressantes pour réaliser des évaluations de projets d'aménagement en phase amont de conception.

Comme l'illustre la littérature, il n'y a pas de consensus sur la meilleure méthode de génération de métamodèles. L'efficacité d'une méthode par rapport à une autre dépend de la linéarité des grandeurs d'intérêt, du nombre de variables de décision considérées et de la stabilité du modèle initial (Jin et al. 2001; Kim 2016). Dans une étude comparative portant sur cinq techniques de construction de métamodèles appliquées à la simulation énergétique d'un bâtiment, Van Gelder et al. (2014) montrent que certaines méthodes sont plus performantes sur un cas d'étude considéré, mais que l'ensemble des méthodes peut être approprié en augmentant par exemple la taille de l'échantillon de construction.

Dans nos travaux, le modèle initial est celui du logiciel de simulation thermique dynamique EnergyPlus, utilisé en tant que boîte noire. La technique de construction de métamodèle choisie est la construction de métamodèle par décomposition par polynômes du chaos. Elle est uniquement basée sur la connaissance d'un échantillon (fini) de couples entrées-sorties du modèle initial et peut donc être qualifiée de méthode non intrusive. De plus les polynômes du chaos sont souvent construits à partir de plans d'expérience de taille raisonnable (Sudret 2008).

6.3.2. Les métamodèles par polynômes du chaos

Le chaos polynomial (PCE, *Polynomial Chaos Expansion*) est une méthode de construction de métamodèles par approximation polynomiale d'une variable aléatoire dans un espace de probabilité.

Introduit dans les années 30 par Wiener (1938), le chaos homogène consiste à approcher une grandeur d'intérêt aléatoire provenant d'un espace probabilisé par projection dans une base orthonormée de polynômes à variables multiples dépendant de chaque variable d'entrée aléatoire. Dans la version originale de Wiener, la base considérée est une base de polynômes d'Hermite d'une variable aléatoire gaussienne centrée réduite. Cette version a ensuite été généralisée par Xiu & Karniadakis (2002) avec la prise en compte de variables à distribution non gaussienne et d'autres bases de polynômes orthogonaux correspondantes, il s'agit du chaos polynomial généralisé. Quelques distributions de variables et les familles de polynômes orthogonaux associées sont présentées dans le Tableau 44.

Type de variable	Distribution de probabilité	Base Polynomiale	Support
Continue	Gaussienne	Hermite	$(-\infty, +\infty)$
	Gamma	Laguerre	$[0, +\infty)$
	Beta	Jacobienne	$[a, b]$
	Uniforme	Legendre	$[a, b]$
Discrète	Poisson	Charlier	$\{0, 1, 2, \dots, N\}$
	Binomiale	Krawtchouk	$\{0, 1, 2, \dots, N\}$

Tableau 44 - Distribution de probabilité des variables et famille de polynômes orthogonaux associés (Xiu & Karniadakis 2002)

Nous tâchons ci-dessous de décrire succinctement la théorie du chaos polynomial afin de rendre son application intelligible pour présenter la suite de nos travaux. Pour un accès détaillé aux mathématiques sous-jacentes, le lecteur peut se référer à Xiu & Karniadakis (2002).

L'objectif est de modéliser une grandeur d'intérêt Y provenant d'un modèle numérique f (eq. 56) par un développement en série selon l'équation (eq. 58). Dans ce développement \vec{Z} est un vecteur de composantes indépendantes construit selon une collection de distribution μ_{z_i} . \vec{Z} est de même dimension que \vec{X} et est construit de sorte que Γ soit une transformation isoprobabiliste telle que $\vec{Z} = \Gamma(\vec{X})$. Une loi de distribution μ_{z_i} est ainsi attribuée à chaque composante indépendante du vecteur \vec{Z} . Pour chaque variable d'entrée z_i , une base spécifique est alors choisie en fonction de sa loi de distribution (selon le Tableau 44). L'objectif est de représenter Y à l'aide de \vec{Z} et d'une série de polynômes orthonormés $(\psi_i)_{i \in \mathbb{N}}$, puis d'estimer les coefficients du développement α_i correspondant aux coordonnées de la réponse du modèle dans la base polynomiale ainsi définie.

$$Y = g(\vec{Z}) = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i \psi_i(\vec{Z}) \quad \text{eq. 58}$$

Pour des raisons de calculs numériques, la série de polynômes est tronquée à l'ordre p de façon à ne conserver que les polynômes ψ_i de la base dont le degré total est inférieur ou égal à p . La nouvelle série tronquée s'écrit alors selon l'équation (eq. 59) où P est le nombre d'éléments de la suite et donc de coefficients α_i à calculer. P dépend du nombre de variables d'entrée n et du degré maximum des polynômes p et est déterminé selon l'équation (eq. 60).

$$\tilde{Y} = h(\vec{Z}) = \sum_{i=0}^{p-1} \tilde{\alpha}_i \psi_i(\vec{Z}) \quad \text{eq. 59}$$

$$P = \binom{n+p}{p} = \frac{(n+p)!}{n! p!} \quad \text{eq. 60}$$

A partir de la transformation isoprobabiliste Γ , l'équation (eq. 59) peut alors s'écrire selon l'équation (eq. 61) et permet de retrouver l'expression du métamodèle \mathbf{M} de l'équation (eq. 57).

$$\tilde{Y} = \mathbf{M}(\vec{X}) = \sum_{i=0}^{p-1} \tilde{\alpha}_i \psi_i \circ \Gamma(\vec{X}) \quad \text{eq. 61}$$

L'étape suivante consiste alors à déterminer les coefficients α_i pour obtenir l'expression complète du métamodèle. Il existe plusieurs méthodes de détermination de ces coefficients. Le programme que nous utilisons par la suite dans nos travaux pour construire les métamodèles emploie la minimisation par moindres carrés. Cette méthode d'approximation consiste à rechercher les coefficients par régression en minimisant l'erreur quadratique entre le modèle polynomial et le modèle étudié.

Le nombre de coefficients P à calculer est déterminé selon l'équation (eq. 60). Selon le nombre de variables n , plus le degré du polynôme à calculer sera important plus le nombre de coefficients augmentera. Partant du principe que la taille de l'échantillon N doit être au minimum égale au nombre de coefficients P il apparaît clairement qu'elle dépend aussi largement du degré du polynôme p . La construction du métamodèle requiert alors la détermination d'une taille d'échantillon N et d'un degré de polynôme p adaptés au respect de contraintes de temps et de précision.

Plusieurs paramètres doivent ainsi être réglés dans la construction d'un métamodèle selon la technique du chaos polynomial. Un polynôme d'ordre trop faible ne permettra pas de représenter précisément la grandeur d'intérêt qui doit être modélisée. A l'inverse, un polynôme de degré trop élevé va nécessiter l'approximation d'un nombre de coefficients P très important qui va induire une taille d'échantillon N également importante sans quoi la qualité de la réponse sera réduite.

6.3.3. Le modèle de référence EnergyPlus à approximer

Comme mentionné précédemment dans l'ensemble de nos travaux, le moteur de simulation thermique dynamique auquel nous faisons appel est EnergyPlus. Nous précisons ici le modèle urbain (3D) sur lequel nous travaillons, ainsi que les hypothèses de simulations EnergyPlus que nous lui associons. Ceci constitue le modèle de référence auquel nous voulons substituer des métamodèles pour l'évaluation des besoins de chaud et de froid.

Géométrie du modèle de référence

Le modèle de référence est constitué d'un réseau régulier de 9 bâtiments identiques de type « blocs » (Figure 67). Le bâtiment central constitue le bâtiment d'étude, c'est-à-dire celui dont les besoins annuels de chaud et de froid sont à évaluer. Du point de vue des besoins thermiques, il est supposé représentatif de la configuration urbaine étudiée (d'extension infinie). Les 8 blocs périphériques sont des masques solaires pour le bâtiment d'étude. Les blocs périphériques et la surface au sol (les rues) constituent l'environnement urbain du bâtiment d'étude. Le bâtiment d'étude est divisé en étages. La simulation thermique est dite monozone par étage, ce qui signifie que l'on attribue une unique zone thermique à chaque étage. Enfin pour chaque façade de chaque étage, on modélise un unique vitrage, centré sur la façade et respectant les taux de vitrage suivants spécifiés par orientation ; 50% de vitrage pour les façades Sud, 10% de vitrage pour les façades Nord et 20% de vitrage pour les façades Est et Ouest.

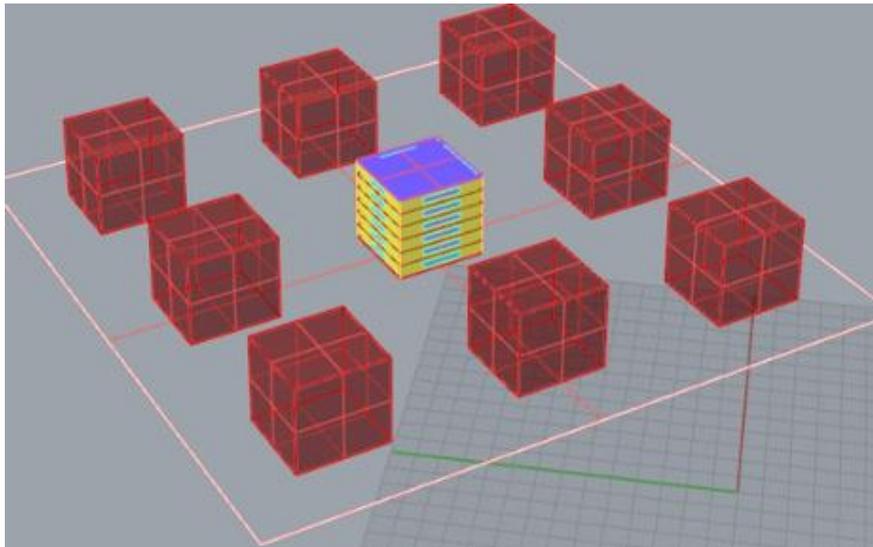


Figure 67 – Géométrie du modèle de référence

Hypothèses de simulation

Les simulations sur lesquelles nous travaillons sont des simulations monozones par étage des besoins annuels (1 janvier – 31 décembre) de chaud et de froid de bâtiment résidentiels collectifs. La consigne de chauffage est fixée à 19°C et la consigne de refroidissement est fixée à 26°C. Ces besoins sont ici évalués en l’absence de protections solaires et de volets. Nous cherchons via ces simulations à évaluer le potentiel de chauffage passif et le potentiel de confort d’été passif d’une forme urbaine, et non pas les réels besoins de chaud et de froid pour lesquels nos hypothèses seraient trop simplificatrices.

L’environnement urbain est pris en compte via les masques solaires (8 bâtiments périphériques), ainsi que via les inter-réflexions dans la scène urbaine à la fois sur les bâtiments périphériques et sur les surfaces des rues (dont nous pouvons spécifier les albédos). EnergyPlus ne permet par contre pas la prise en compte des échanges radiatifs GLO au sein de la scène urbaine, ce qui constitue une des limites de nos travaux. En effet dans EnergyPlus⁶, les échanges radiatifs GLO pour une surface du bâtiment d’étude sont calculés à partir de la sommation d’échanges avec le sol, le ciel et l’air ambiant (eq. 62). Les coefficients d’échange radiatif pour chacune de ces variables environnementales sont calculés selon eq. 63 où σ est la constante de Stefan-Boltzmann et ε l’émissivité de la surface. L’hypothèse majeure de cette approche est que les surfaces du bâtiment modélisé et celles des bâtiments adjacents sont considérées à une température uniforme, ainsi les échanges radiatifs entre elles sont négligés.

$$Q_{GLO,EnergyPlus} = h_{r,sol}(T_{surf} - T_{sol}) + h_{r,ciel}(T_{surf} - T_{ciel}) + h_{r,air}(T_{surf} - T_{air}) \quad eq. 62$$

$$h_{r,variable} = \frac{\varepsilon\sigma(T_{surf}^4 - T_{variable}^4)}{T_{surf} - T_{variable}} \quad eq. 63$$

Une seconde limite de ces travaux est qu’ils ne permettent pas la prise en compte des effets de la végétalisation des différentes surfaces urbaines.

Les hypothèses de simulation complémentaires sont présentées dans le Tableau 45, notamment les charges et les caractéristiques des surfaces.

Type de bâtiments	Résidentiel collectif
--------------------------	-----------------------

⁶ <http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/engineering-reference/page-020.html>

Consigne de chauffage	19 °C
Consigne de refroidissement	26 °C
Charges	
Equipements	2 W/m ²
Eclairage	5 W/m ²
Occupation	0,028 personne/m ²
Ventilation	0,001 m ³ /s.personne + 0,0002 m ³ /s.m ²
Infiltration	0,000227 m ³ /s.m ²
Caractéristiques des Surfaces	
Murs	20 cm béton de conductivité 1,73 W/(m.K) 14 cm laine de verre de conductivité 0,035 W/(m.K)
Toit	20 cm béton de conductivité 1,73 W/(m.K) 30 cm laine de verre de conductivité 0,035 W/(m.K)
Fenêtres	Coefficient de transmission thermique : U = 2,8 W/(m.K)

Tableau 45 - Hypothèses de simulation thermique dynamique pour le modèle de référence

Enfin, les simulations sont bien sûr dépendantes de la localisation et de la météo. Notre objectif étant d'établir des modèles de substitution à ce modèle de référence EnergyPlus, il nous faut fixer également ces paramètres. Nous proposons de nous appuyer sur les 8 zones thermiques de la réglementation thermique (Figure 68). Pour chaque zone, une ville représentative est définie. Dans la suite de nos travaux, nous travaillons avec les données météo d'Agen, ville représentative de la zone géographique H2c. Les métamodèles développés ci-après ne seront donc valables que pour cette seule zone. La prise en compte de l'ensemble des zones géographiques par notre approche nécessite l'établissement de métamodèles pour chacune des zones.



Figure 68 - Zones géographiques de la Réglementation Thermique RT2012

6.3.4. Démarche adoptée pour la génération des métamodèles

La démarche adoptée pour la génération de nos métamodèles est une démarche en 6 étapes (Figure 69).

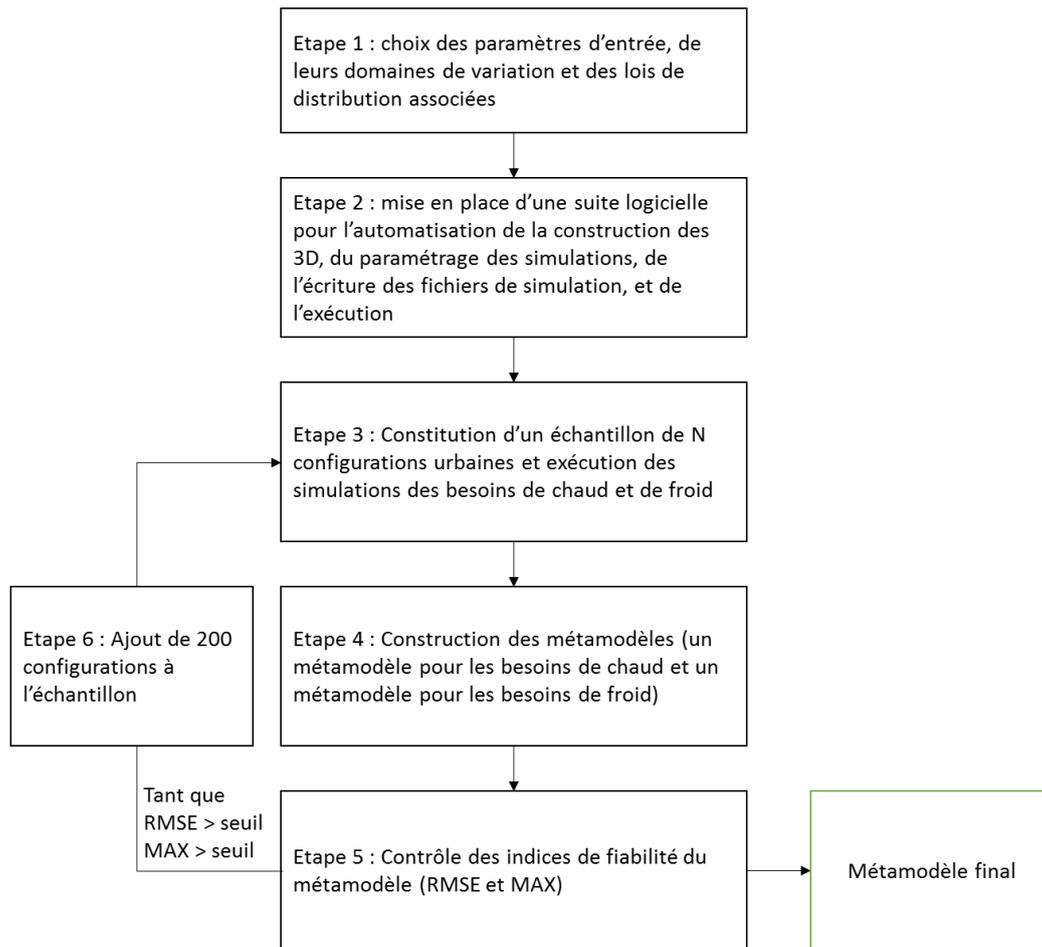


Figure 69 - Etapes de la démarche adoptée pour la génération des métamodèles

Etape 1 : choix des paramètres d'entrée, de leurs domaines de variation et des lois de distribution associées

Le Tableau 46 ci-dessous présente les paramètres d'entrée ainsi que leurs domaines de variation et lois de probabilité associées.

Le choix des domaines de variation résulte d'un compromis entre la possibilité de représenter un large éventail de configurations urbaines et la limitation des domaines de variation pour obtenir des métamodèles performants. Dans notre approche, ces domaines de variation sont considérés comme des espaces de conception. C'est pourquoi, afin de favoriser l'exploration de l'ensemble des domaines de variation, nous faisons le choix de lois de distribution uniformes pour l'ensemble de nos variables d'entrée.

Paramètre (abréviation)	Domaine de variation	Distribution de probabilité
Orientation	[-45° ; 45°]	uniforme
Dimension du bâtiment selon l'axe X (x_bat)	[8m ; 70m]	uniforme
Dimension du bâtiment selon l'axe Y (y_bat)	[8m ; 70m]	uniforme
Largeur des rues transversales à l'axe X (x_lr)	[6m ; 44m]	uniforme
Largeur des rues transversales à l'axe Y (y_lr)	[6m ; 44m]	uniforme
Nombre de niveaux (nbr_niveau)	[2 ; 12]	uniforme
Hauteur d'un niveau (h_niveau)	[2,5m ; 4m]	uniforme
Albédo des bâtiments (albedo_batiment)	[0,1 ; 0,8]	uniforme
Albédo du sol (albedo_rue)	[0,05 ; 0,45]	uniforme

Tableau 46 – Paramètres, domaines de variation et lois de probabilité

Etape 2 : automatisation de la construction des modèles 3D, du paramétrage et de l'exécution des simulations

La construction des géométries du bâtiment d'étude et du contexte urbain, la définition des zones thermiques (Figure 67), le paramétrage des simulations, l'écriture des fichiers de simulations, ainsi que l'exécution des simulations, sont automatisées à l'aide des logiciels Rhinoceros (McNeel 2013b), Grasshopper (McNeel 2013a), Honeybee (Roudsari 2013) et EnergyPlus. Rhinoceros est l'outil de dessin 3D. Grasshopper est un plugin de Rhinoceros permettant de faire du dessin paramétrique. Honeybee est un plugin environnemental open source pour Grasshopper qui relie Grasshopper au moteur de simulation thermique dynamique EnergyPlus. Les développements d'Honeybee visent à rendre paramétriques les fonctionnalités d'EnergyPlus.

Dans cet environnement, nous avons mis en place une chaîne de simulation permettant d'obtenir les besoins de chaud et de froid d'un échantillon de N formes urbaines de type « blocs » à partir d'un fichier texte récapitulant les paramètres de l'ensemble des N configurations. Ce fichier texte a la structure suivante : N lignes, chaque ligne correspondant à une configuration urbaine et contenant les paramètres listés dans le Tableau 46.

A la lecture de chaque ligne les étapes suivantes sont réalisées pour construire puis simuler le modèle de référence EnergyPlus de la configuration urbaine correspondante :

- Construction du modèle 3D de la configuration urbaine à partir des paramètres d'entrée ; x_bat , y_bat , x_lr , y_lr , nbr_niveau et h_niveau
- Découpage du bâtiment d'étude en étages, affectation des zones thermiques, construction des vitrages et définition de la nature des différentes surfaces
- Attribution des albédos au bâtiment d'étude, aux bâtiments périphériques ainsi qu'aux rues.
- Lancement de la simulation des besoins annuels de chaud et de froid.

Etape 3 : constitution d'un échantillon de configurations urbaines et exécution des simulations

A partir des lois de distribution spécifiées pour chaque paramètre d'entrée, nous constituons un échantillon de N configurations urbaines par tirage aléatoire des paramètres d'entrée (échantillon de type Mont-Carlo). Puis nous simulons cet échantillon grâce à la chaîne logicielle mise en place à l'étape 2. Les résultats sont, pour chacune des N configurations urbaines de l'échantillon, les besoins annuels de chaud et de froid en Wh/m².

Etape 4 : construction des métamodèles

Nous utilisons la boîte à outils ASPIC (Durand-Estebe et al. 2016) pour construire un métamodèle pour les besoins de chaud et un métamodèle pour les besoins de froid sur la base des N résultats de simulation. Nous fixons le degré maximal du polynôme, c'est-à-dire l'ordre maximal du métamodèle à 6 (pour des raisons de temps de calcul nous ne pouvons pas nous permettre de tester des polynômes d'ordre supérieur, car cela nécessiterait un nombre N de simulations trop important). ASPIC utilise 90% de l'échantillon pour construire les métamodèles et les 10% restant pour les tester via le calcul des indices suivants : RMSE (*Root mean Square Error*, erreur quadratique moyenne), MAX (erreur maximum).

Soit n la taille de la base de validation, \tilde{y}_i la $i^{\text{ème}}$ prédiction et y_i la $i^{\text{ème}}$ valeur exacte, ces indices d'erreur se calculent de la manière suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2} \quad \text{eq. 64}$$

$$MAX = \max(\text{abs}(y_i - \tilde{y}_i))$$

eq. 65

ASPIC sélectionne à chaque étape parmi les métamodèles de différents ordres, celui qui donne les meilleurs résultats en termes de RMSE.

Etape 5 : contrôle de la fiabilité du métamodèle

A chaque itération (augmentation de la taille de l'échantillon), on contrôle l'évolution de RMSE et MAX, ainsi que le degré du polynôme obtenu. L'idéal serait de pouvoir définir à priori des critères objectifs, notamment sur l'évolution de RMSE et MAX pour déterminer les cas où l'on considère le métamodèle correct. En pratique il est très difficile de se prononcer à priori et nous avons eu recours à un compromis entre la stabilisation de l'évolution de RMSE, la stabilisation du degré du polynôme à l'ordre 5 et la taille de l'échantillon.

Etape 6 : augmentation de la taille de l'échantillon

Si le métamodèle n'est pas satisfaisant (au regard notamment de RMSE), on ajoute 200 configurations à l'échantillon et on réitère à partir de l'étape 3.

6.3.5. Construction des métamodèles

Par application de la démarche présentée ci-dessus nous obtenons les résultats suivants pour l'évolution des indices de fiabilité des métamodèles et du degré du polynôme (ordre du métamodèle) (Figure 70, Figure 71, Figure 72 et Figure 73).

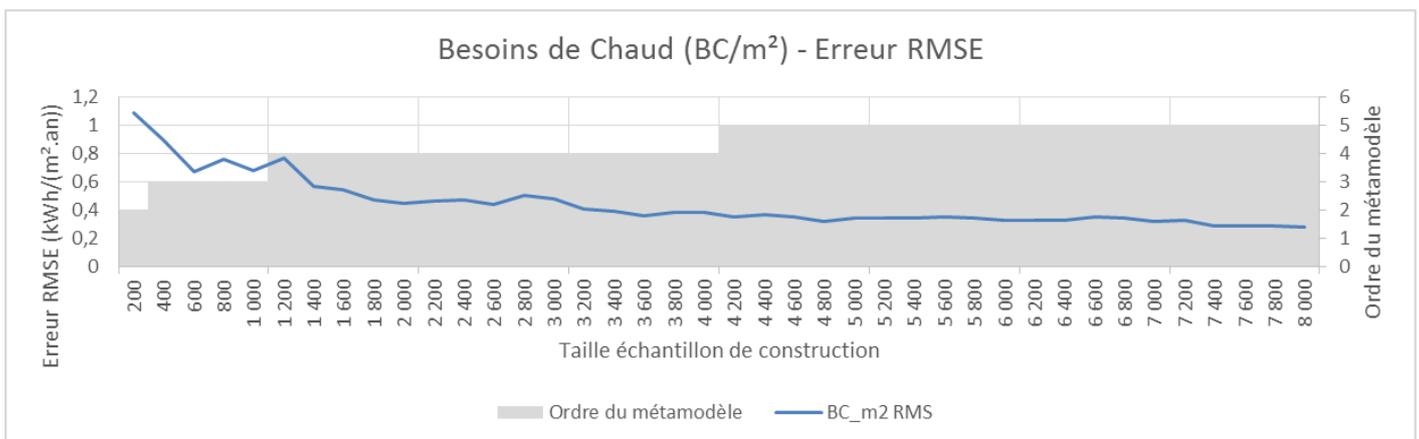


Figure 70 - Evolution de l'erreur RMSE et de l'ordre du métamodèle des besoins de chaud selon la taille de l'échantillon

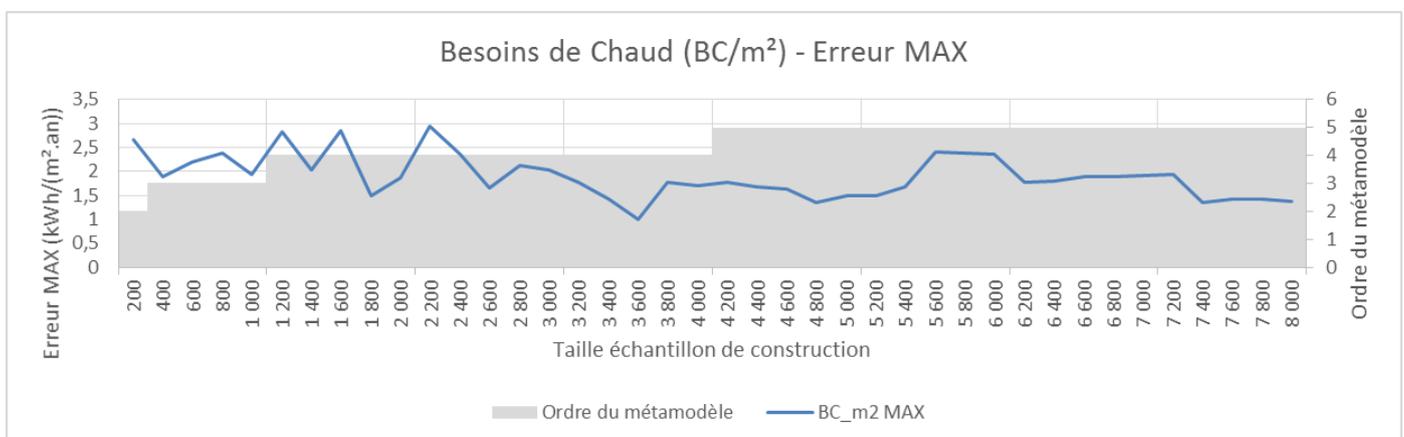


Figure 71 – Evolution de l'erreur MAX et de l'ordre du métamodèle des besoins de chaud selon la taille de l'échantillon

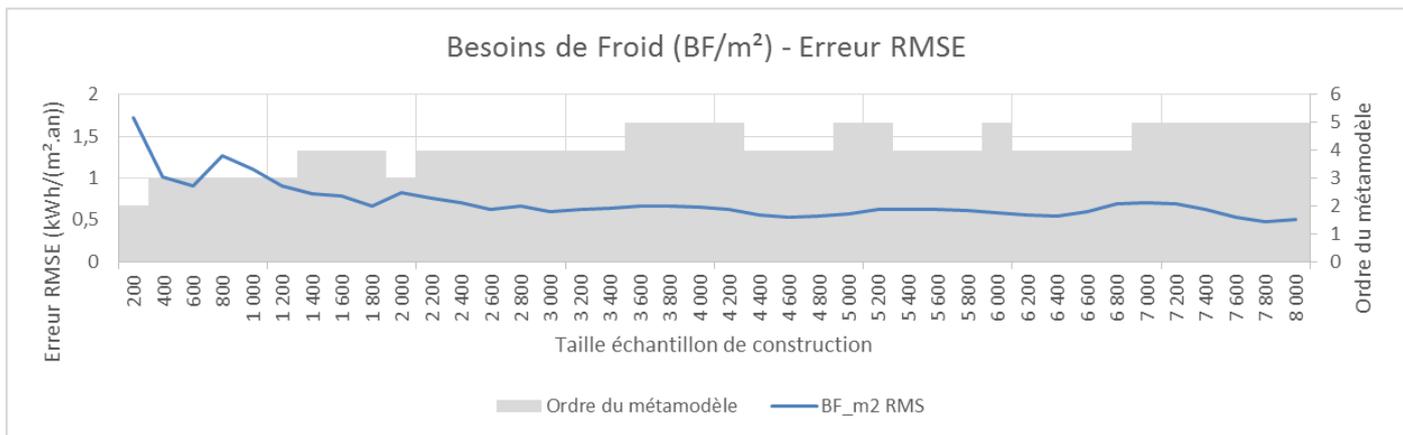


Figure 72 - Evolution de l'erreur RMSE et de l'ordre du métamodèle des besoins de chaud selon la taille de l'échantillon

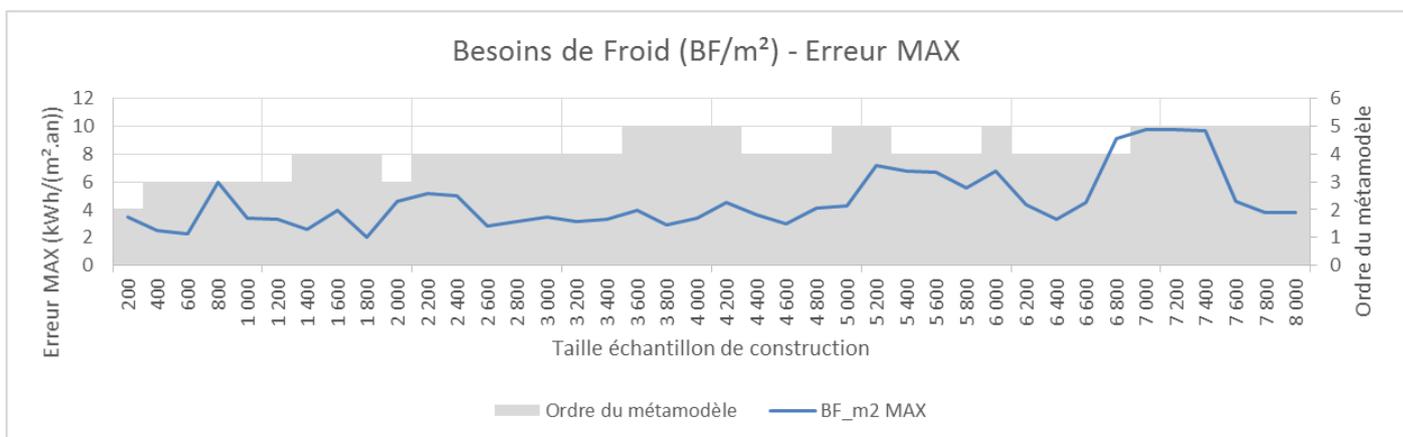


Figure 73 - Evolution de l'erreur MAX et de l'ordre du métamodèle des besoins de chaud selon la taille de l'échantillon

S'agissant du métamodèle sur les besoins de chaud, on constate une diminution franche de la RMSE avec l'augmentation de la taille de l'échantillon jusqu'à 4000 configurations urbaines. Ensuite la diminution de la RMSE continue mais plus lentement. C'est également à partir d'un échantillon de 4000 configurations que le degré du polynôme se stabilise à l'ordre 5.

S'agissant du métamodèle sur les besoins de froid, on constate une diminution franche de la RMSE avec l'augmentation de la taille de l'échantillon jusqu'à 3000 configurations urbaines. Ensuite la RMSE se stabilise autour de valeurs proches de 0,6 Wh/(m².an).

Que ce soit pour les besoins de chaud et de froid, l'erreur MAX ne diminue pas avec l'augmentation de la taille de l'échantillon, elle aurait même plutôt tendance à augmenter. Cela traduit le fait que statistiquement plus l'échantillon est de taille importante, plus il est probable qu'il contienne des configurations particulières qui soient mal approximées par les métamodèles.

Pour la suite, nous conservons les métamodèles obtenus à partir de l'échantillon complet de 8000 simulations. Pour les besoins de chaud, l'erreur RMSE est de 0,28 kWh/m². Pour les besoins de froid, l'erreur RMSE est de 0,51 kWh/m².

Pour ces métamodèles que nous retenons, le Tableau 47 présente les statistiques des erreurs relatives (en valeur absolue) à la fois pour l'échantillon complet (8000) et pour la base de validation (800 configurations).

Erreur relative	Besoins de chaud	Besoins de froid
-----------------	------------------	------------------

(valeur absolue)	Echantillon complet (8000 configurations)	Base de validation (800 configurations)	Echantillon complet (8000 configurations)	Base de validation (800 configurations)
Moyenne	0,9%	1,3%	2,1%	3,1%
Ecart-type	0,8%	1,1%	2,3%	3,5%
max	8,3%	7,3%	47,5%	47,5%

Tableau 47 – Statistiques des erreurs relatives des métamodèles pour les besoins de chaud et de froid

On constate bien sûr que les métamodèles sont plus performants sur l'ensemble de l'échantillon (majoritairement composé de la base d'apprentissage) que sur la base de validation (moyenne et écart type des erreurs relatives plus faibles lorsque l'on considère l'ensemble de l'échantillon). Cependant les performances sur la base de validation restent comparables. Le métamodèle pour les besoins de chaud est plus performant que le métamodèle pour les besoins de froid. Enfin l'erreur relative maximale est relativement limitée s'agissant des besoins de chaud (8,3%), elle atteint un niveau très élevé dans le cas des besoins de froid (47,5%).

Sur l'échantillon total, le métamodèle pour les besoins de chaud induit une erreur de prédiction inférieure à 3%, 5% et 10% dans respectivement 97,1%, 99,7% et 100% des cas. Le métamodèle pour les besoins de froid induit quant à lui une erreur de prédiction inférieure à 3%, 5% et 10% dans respectivement 77,9%, 91,8% et 98,7% des cas.

6.4. TEST ET DISCUSSION DE LA METHODE

6.4.1. Méthode de test

Afin de discuter et valider notre approche nous l'avons testée sur 45 cas d'étude ; 9 quartiers réels et 36 quartiers obtenus par des variations sur 6 formes urbaines génériques. Pour chaque cas d'étude nous avons réalisé trois types d'évaluations (Figure 74) :

1. **Simu_E+_réel** : simulation via EnergyPlus des besoins thermiques de chaque bâtiment constituant le quartier à partir de la géométrie réelle du quartier
2. **Simu_E+_équivalent** : simulation via EnergyPlus des besoins thermiques du quartier générique équivalent
3. **Eval_MM** : évaluation via nos métamodèles des besoins thermiques du quartier équivalent

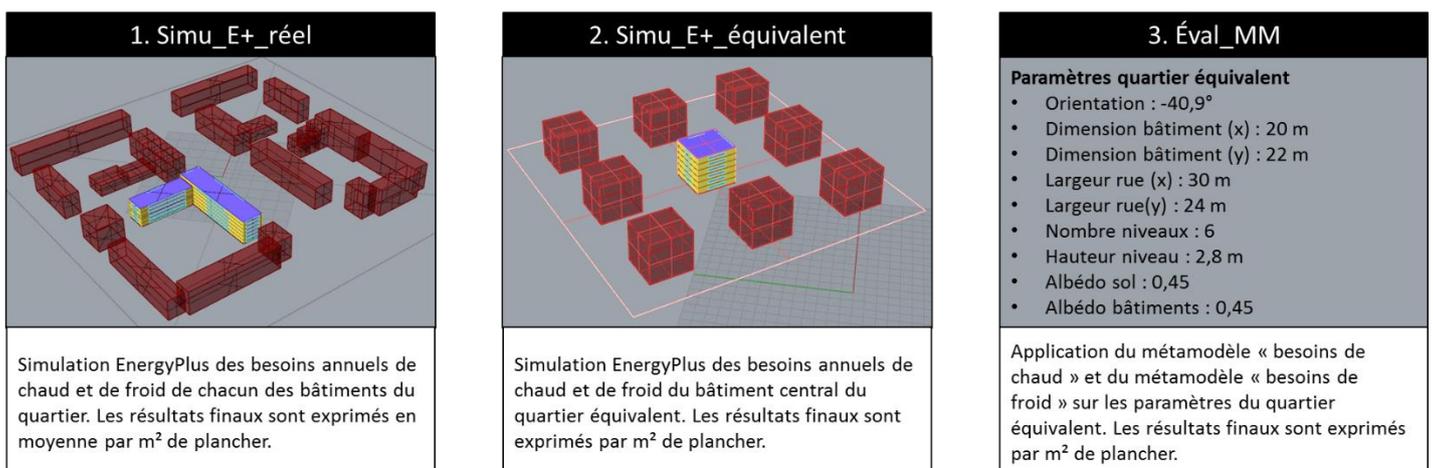


Figure 74 – Les trois types d'évaluation menées dans le cadre du test de l'approche de modélisation des besoins thermiques

Les comparaisons entre **Simu_E+_équivalent** et **Simu_E+_réel** nous permettent de juger de la capacité du quartier générique équivalent à reproduire les besoins thermiques du quartier réel, c'est-à-dire la fiabilité de l'étape 1 de notre méthode.

Les comparaisons entre **Eval_MM** et **Simu_E+_equivalent** nous permettent de juger de la fiabilité de nos métamodèles, c'est-à-dire de la fiabilité de la seconde étape de notre méthode.

Les comparaisons entre **Eval_MM** et **Simu_E+_réel** nous permettent de juger de la validité de notre approche au global.

6.4.2. Corpus de cas d'étude

Notre corpus de cas d'étude est composé de 9 quartiers réels (Figure 75) et de 36 quartiers obtenus à partir de variations du nombre d'étages (3, 6 et 9 niveaux) et de d'orientation (0° et 30°) appliquées à 6 formes urbaines génériques (Figure 76).

La nomenclature des formes génériques est la suivante ; **FGX_Yn_OrZ**, avec **X** l'indice de la forme (variant de 1 à 6), **Y** le nombre de niveaux (3, 6 ou 9) et **Z** l'orientation (0 pour une orientation nord-sud ou 30 pour une rotation de 30° vers l'est).

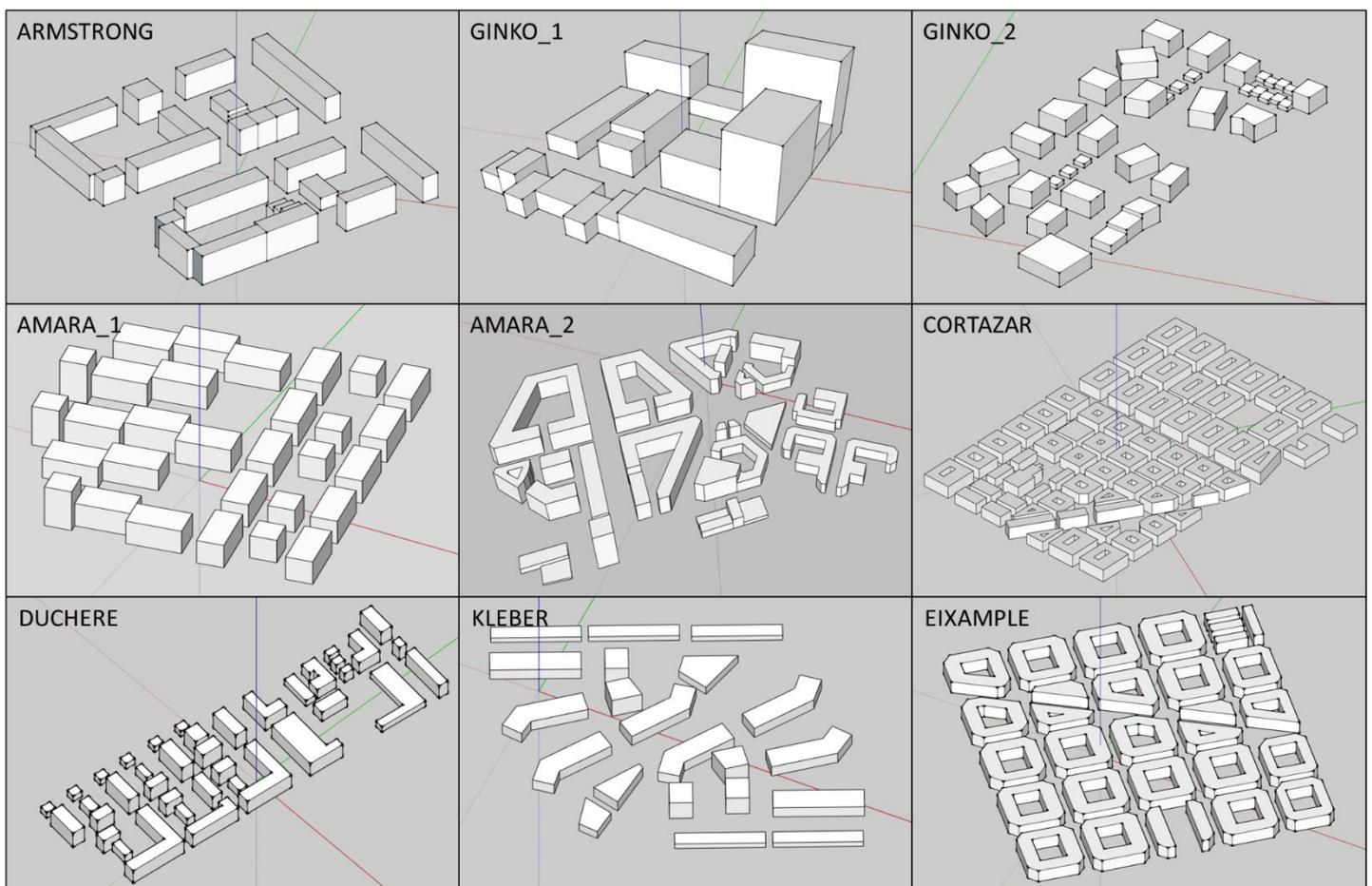


Figure 75 - Corpus de cas d'étude; quartiers réels

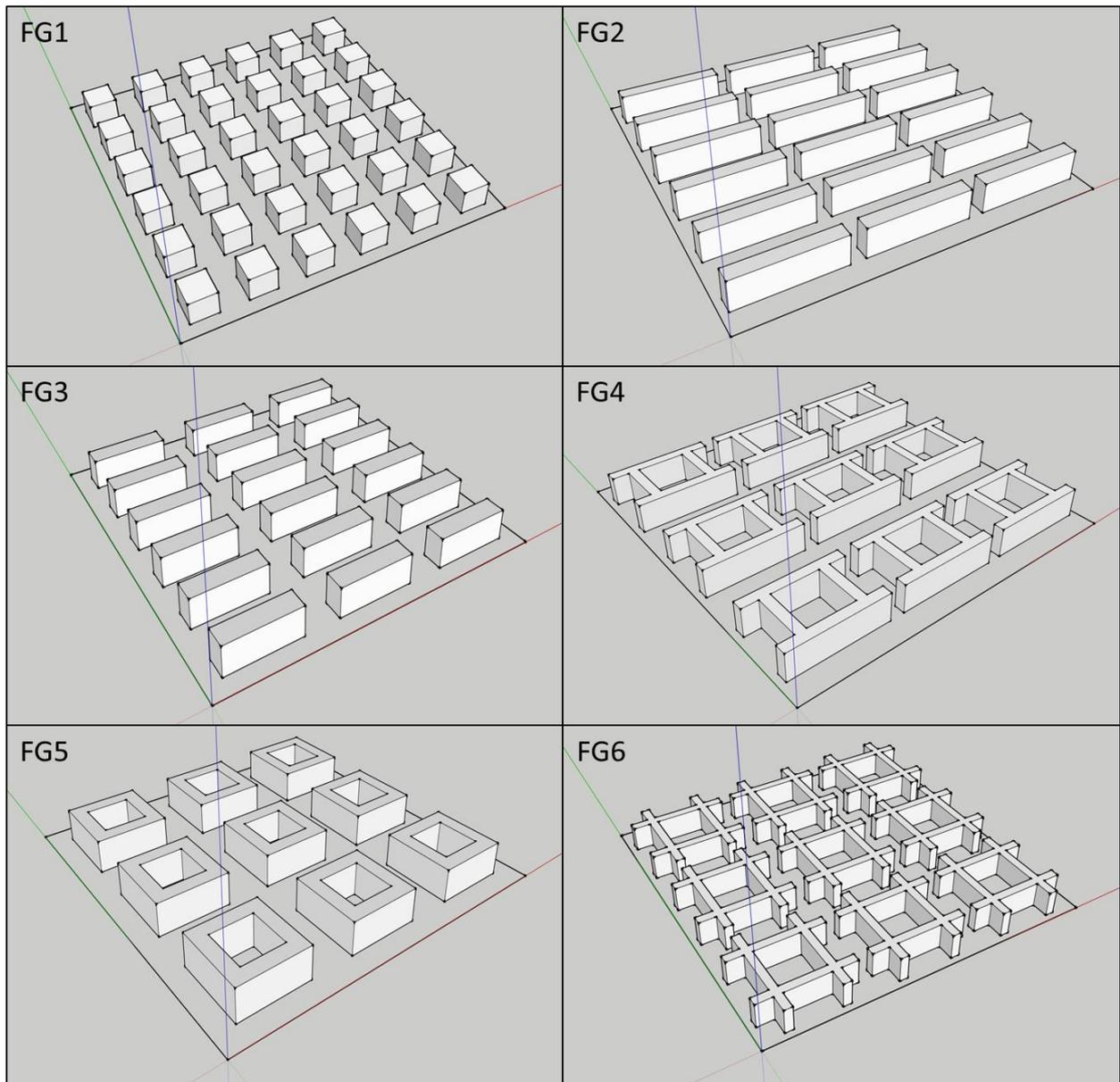


Figure 76 - Corpus de cas d'étude; 6 formes génériques dérivées de (Martin & March 1972)

Ce corpus de cas d'étude a été constitué pour rendre compte de la diversité des formes urbaines existantes, non seulement en termes de typologie de bâtiments et d'ilots, mais également en termes de densité. Ainsi les quartiers réels que nous avons sélectionnés présentent une grande variété de formes, hauteurs, densités et régularité. La majorité de ces cas d'étude a également été sélectionnée parce qu'il s'agit de quartiers sur lesquels l'outil NEST a déjà été utilisé, ce qui nous permet de tester notre approche dans un cadre opérationnel. Des formes urbaines génériques viennent compléter notre échantillon. Elles sont dérivées de la typologie de formes urbaines archétypales proposée par (Martin & March 1972) et qui a très largement été reprise dans le cadre d'études sur la morphologie urbaine (Ratti et al. 2003; Salat 2011). Les 6 formes archétypales originales (Figure 77) proviennent de la combinaison de trois éléments de base ; des bâtiments de type « blocs », des bâtiments de type « à cours », et les rues qui potentiellement s'étendent à l'infini selon les deux axes. Le corpus final prend bien en compte la diversité des formes urbaines, ainsi que la diversité des densités urbaines, comme le montre la couverture large du diagramme Spacemate (représentation multi-variée de la densité urbaine présentée au Chapitre 3) par les cas d'étude (Figure 78).

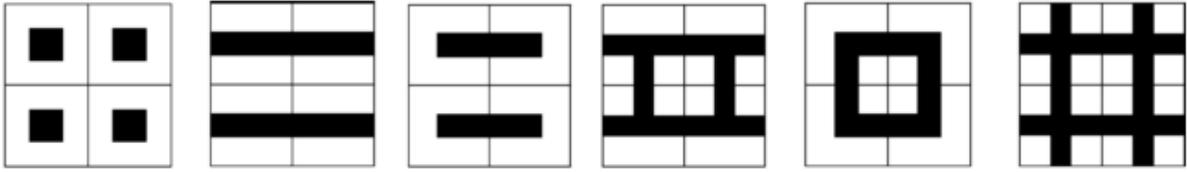


Figure 77 – Formes urbaines archétypales proposées par (Martin & March 1972)

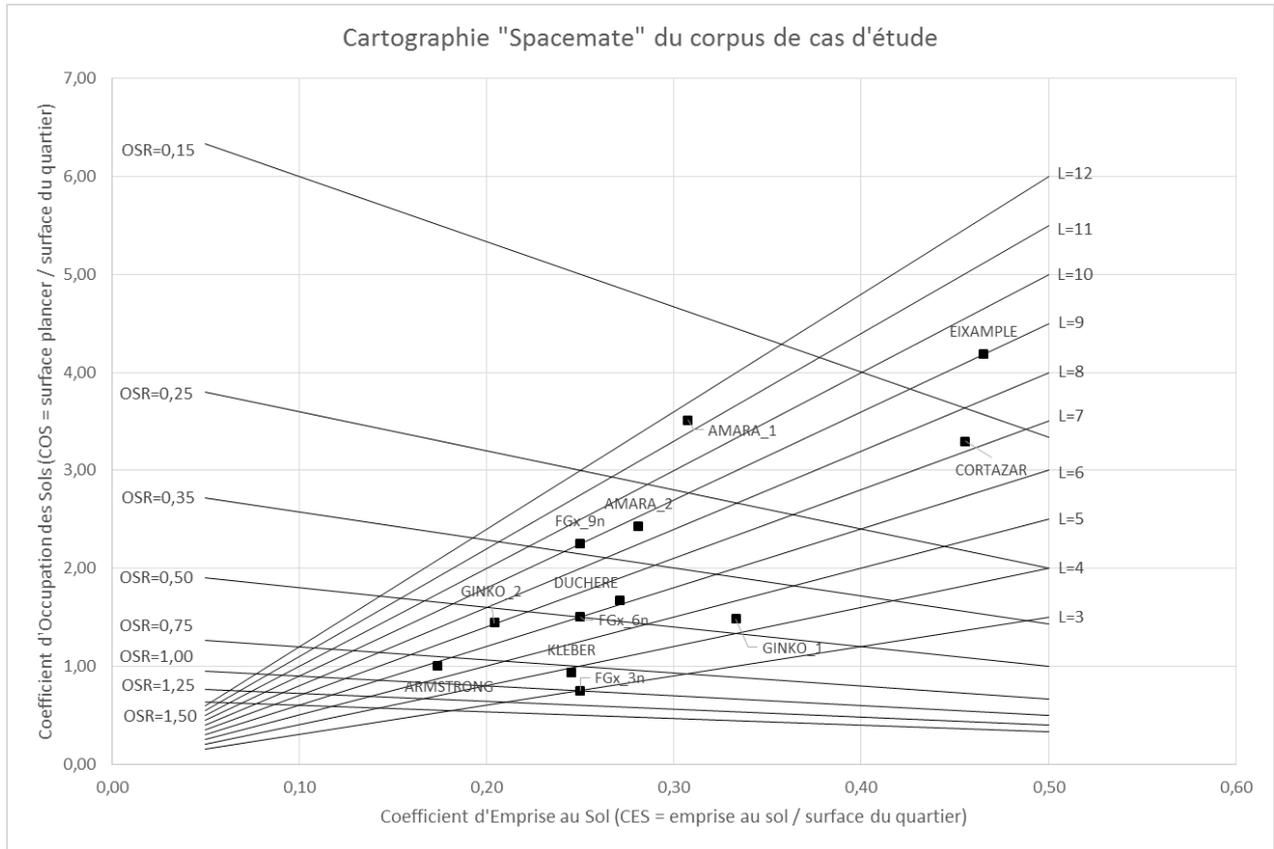


Figure 78 - Cartographie Spacemate (Berghauser Pont & Haupt 2005) du corpus de cas d'étude

6.4.3. Résultats

Les résultats détaillés d'évaluation des besoins thermiques selon les trois méthodes (1. Simu_E+_réel, 2. Simu_E+_équivalent et 3. Eval_MM) sont présentés dans les Tableau 48 et Tableau 49, respectivement pour les besoins de chaud et de froid. Dans ces tableaux nous présentons également pour chaque cas d'étude:

- l'erreur relative totale induite par notre approche simplifiée d'évaluation des besoins thermiques (err_tot)
- l'erreur relative associée à l'étape 1 de notre méthode, à savoir l'approximation d'un quartier réel par un quartier générique équivalent de type « bloc » (err_étape1)
- l'erreur relative associée à l'étape 2 de notre méthode, à savoir l'évaluation d'un quartier générique de type bloc par les métamodèles que nous avons construits (err_étape2)

Dans les tableaux apparaissent en vert les erreurs inférieures à 5% en valeur absolue, en jaune les erreurs comprises entre 5% et 10% en valeur absolue, et en rouge les erreurs supérieures à 10% en valeur absolue.

Pour notre corpus de cas d'étude, les besoins de chaud simulés via EnergyPlus sur les quartiers réels varient du simple au double (de 10,5 kWh/m² à 21,6 kWh/m²). La moyenne de ces besoins de chaud est de 14,1 kWh/m² et l'écart type est de 2,7 kWh/m². La plage de variation des besoins de froid est plus étendue ; de 8,5 kWh/m² à 27,4 kWh/m². La moyenne des besoins de froid est de 19,1 kWh/m² et l'écart type est de 4,3 kWh/m².

Que ce soit pour les besoins de chaud ou les besoins de froid, les plages de variations sont relativement étendues, mais la faiblesse des écarts types laisse entrevoir de possibles difficultés à discriminer les différents quartiers de notre corpus de cas d'étude par l'application d'une approche simplifiée telle que celle que nous avons développée.

(kWh/m ²)	BESOINS DE CHAUD			Erreurs relatives (%)		
	1. Simulation E+ quartier réel	2. Simulation E+ quartier équivalent	3. Evaluation métamodèle	err_tot (entre 1. & 3.)	err_étape 1 (entre 1. & 2.)	err_étape 2 (entre 2. & 3.)
ARMSTRONG	12,4	12,1	12,0	-3,3%	-2,8%	-0,6%
GINKO	13,1	14,6	14,7	11,9%	11,5%	0,4%
GINKO_C2	12,6	12,9	12,8	1,6%	2,0%	-0,5%
AMARA_1	12,2	12,8	12,9	5,6%	5,2%	0,4%
CORTAZAR_1	12,7	13,3	13,0	2,6%	4,4%	-1,7%
AMARA_2	10,9	11,0	11,0	1,3%	0,9%	0,4%
KLEBER	12,1	10,8	10,3	-15,1%	-10,8%	-4,8%
DUCHERE	11,7	12,8	12,5	6,8%	9,1%	-2,1%
EIXAMPLE	11,3	11,7	11,8	4,4%	3,5%	0,9%
FG1_3n_Or0	12,2	12,5	12,5	2,3%	2,2%	0,1%
FG1_3n_Or30	13,1	13,4	13,2	0,5%	2,3%	-1,8%
FG1_6n_Or0	12,8	13,6	13,4	4,8%	6,0%	-1,1%
FG1_6n_Or30	13,5	14,2	13,9	2,9%	5,0%	-2,0%
FG1_9n_Or0	14,1	15,1	14,9	5,8%	6,9%	-1,0%
FG1_9n_Or30	14,8	15,5	15,1	2,3%	4,7%	-2,3%
FG2_3n_Or0	11,3	11,7	11,5	1,6%	3,5%	-1,9%
FG2_3n_Or30	12,2	13,1	13,1	7,3%	7,5%	-0,2%
FG2_6n_Or0	12,1	13,0	12,6	4,4%	7,1%	-2,5%
FG2_6n_Or30	12,9	13,8	13,6	5,6%	7,2%	-1,5%
FG2_9n_Or0	14,2	16,0	15,3	7,7%	12,7%	-4,5%
FG2_9n_Or30	14,6	16,2	15,7	7,9%	11,1%	-2,9%
FG3_3n_Or0	10,5	10,7	10,8	3,0%	1,9%	1,0%
FG3_3n_Or30	11,4	11,9	11,8	3,8%	4,2%	-0,5%
FG3_6n_Or0	11,1	11,8	11,7	5,8%	6,2%	-0,3%
FG3_6n_Or30	11,9	12,6	12,3	3,5%	5,6%	-2,0%
FG3_9n_Or0	12,7	13,8	13,8	8,5%	8,4%	0,1%
FG3_9n_Or30	13,2	14,3	14,0	5,9%	8,0%	-1,9%
FG4_3n_Or0	16,2	14,3	14,7	-9,6%	-11,5%	2,2%
FG4_3n_Or30	14,9	15,7	15,7	5,2%	5,1%	0,1%
FG4_6n_Or0	17,1	16,6	16,8	-1,7%	-2,7%	1,1%
FG4_6n_Or30	15,8	17,3	17,6	11,6%	9,6%	1,8%

FG4_9n_Or0	19	18,8	19,1	0,6%	-0,9%	1,5%
FG4_9n_Or30	17,8	19,3	19,7	10,4%	8,6%	1,7%
FG5_3n_Or0	12,6	12,5	12,5	-0,9%	-1,0%	0,1%
FG5_3n_Or30	13,2	13,4	13,2	-0,3%	1,5%	-1,8%
FG5_6n_Or0	12,9	13,6	13,4	4,0%	5,2%	-1,1%
FG5_6n_Or30	13,7	14,2	13,9	1,4%	3,4%	-2,0%
FG5_9n_Or0	14,3	15,1	14,9	4,4%	5,4%	-1,0%
FG5_9n_Or30	15	15,5	15,1	1,0%	3,3%	-2,3%
FG6_3n_Or0	17	17,7	18,5	8,9%	4,4%	4,3%
FG6_3n_Or30	17,6	18,8	19,4	10,4%	6,8%	3,3%
FG6_6n_Or0	18,5	20,6	21,4	15,5%	11,3%	3,8%
FG6_6n_Or30	19,2	21,2	22,1	15,3%	10,6%	4,2%
FG6_9n_Or0	20,8	22,6	23,5	13,0%	8,7%	3,9%
FG6_9n_Or30	21,6	23,3	24,0	11,3%	7,7%	3,4%

Tableau 48 – Résultats d'évaluation des besoins de chaud pour du corpus de cas d'étude et erreurs associées à chaque étape

(kWh/m ²)	BESOINS DE FROID			Erreurs relatives (%)		
	1. Simulation E+ quartier réel	2. Simulation E+ quartier équivalent	3. Evaluation métamodèle	err_tot (entre 1. & 3.)	err_étape 1 (entre 1. & 2.)	err_étape 2 (entre 2. & 3.)
ARMSTRONG	17,2	17,4	16,7	-3,0%	1,2%	-4,2%
GINKO	18,5	15,0	15,4	-16,6%	-19,2%	3,2%
GINKO_C2	16,2	16,5	16,8	3,7%	2,2%	1,5%
AMARA_1	11,7	10,9	11,0	-6,2%	-6,6%	0,5%
CORTAZAR_1	8,5	8,7	8,7	2,5%	2,3%	0,2%
AMARA_2	11,5	11,3	11,4	-1,1%	-2,0%	0,9%
KLEBER	15	16,4	16,1	7,5%	9,4%	-1,7%
DUCHERE	14,9	14,6	15,0	0,9%	-1,9%	2,9%
EIXAMPLE	8,9	8,2	7,5	-15,4%	-7,8%	-8,3%
FG1_3n_Or0	18	17,2	17,1	-5,2%	-4,2%	-1,0%
FG1_3n_Or30	18	18,2	17,2	-4,2%	1,3%	-5,5%
FG1_6n_Or0	18,1	16,9	16,8	-7,1%	-6,8%	-0,3%
FG1_6n_Or30	18,3	17,9	17,5	-4,4%	-2,2%	-2,3%
FG1_9n_Or0	16,5	15,6	15,5	-5,8%	-5,8%	0,0%
FG1_9n_Or30	16,7	16,4	16,4	-1,8%	-1,6%	-0,2%
FG2_3n_Or0	23,7	22,3	20,8	-12,3%	-6,0%	-6,7%
FG2_3n_Or30	25	24,2	20,8	-16,8%	-3,2%	-14,0%
FG2_6n_Or0	23,3	21,7	20,6	-11,4%	-6,8%	-4,9%
FG2_6n_Or30	24,4	23,7	21,2	-13,3%	-2,9%	-10,7%
FG2_9n_Or0	22,3	20,1	19,7	-11,8%	-9,8%	-2,3%
FG2_9n_Or30	23,4	21,7	20,4	-13,0%	-7,4%	-6,0%
FG3_3n_Or0	17,9	17,3	16,6	-7,3%	-3,3%	-4,1%
FG3_3n_Or30	18,2	18,4	17,5	-3,6%	1,0%	-4,6%
FG3_6n_Or0	18,7	17,7	16,9	-9,5%	-5,4%	-4,3%

FG3_6n_Or30	18,7	18,7	18,0	-3,6%	-0,1%	-3,5%
FG3_9n_Or0	17,8	16,6	15,9	-10,4%	-6,9%	-3,7%
FG3_9n_Or30	17,8	17,4	16,9	-5,0%	-2,4%	-2,7%
FG4_3n_Or0	22,2	23,8	23,8	7,0%	7,4%	-0,4%
FG4_3n_Or30	24,8	24,8	23,8	-4,0%	0,1%	-4,1%
FG4_6n_Or0	21,1	22,0	22,3	5,5%	4,2%	1,3%
FG4_6n_Or30	23,5	23,2	22,9	-2,7%	-1,1%	-1,7%
FG4_9n_Or0	18,8	19,8	20,2	7,5%	5,1%	2,3%
FG4_9n_Or30	21,1	20,8	21,0	-0,7%	-1,6%	0,9%
FG5_3n_Or0	17,7	17,2	17,1	-3,6%	-2,6%	-1,0%
FG5_3n_Or30	17,3	18,2	17,2	-0,3%	5,4%	-5,5%
FG5_6n_Or0	17,6	16,9	16,8	-4,5%	-4,2%	-0,3%
FG5_6n_Or30	17,2	17,9	17,5	1,7%	4,0%	-2,3%
FG5_9n_Or0	16,2	15,6	15,5	-4,0%	-4,0%	0,0%
FG5_9n_Or30	16	16,4	16,4	2,5%	2,7%	-0,2%
FG6_3n_Or0	27,4	24,8	25,8	-6,0%	-9,5%	3,9%
FG6_3n_Or30	26,5	26,3	25,8	-2,6%	-0,8%	-1,9%
FG6_6n_Or0	24,7	21,7	22,9	-7,2%	-12,1%	5,5%
FG6_6n_Or30	24,1	23,1	23,4	-2,8%	-4,2%	1,4%
FG6_9n_Or0	21,7	19,0	20,3	-6,6%	-12,5%	6,7%
FG6_9n_Or30	21,3	20,0	21,0	-1,6%	-6,1%	4,8%

Tableau 49 - Résultats d'évaluation des besoins de froid pour du corpus de cas d'étude et erreurs associées à chaque étape

6.4.3.1. Analyse sur les besoins de chaud

Résultats de l'étape 1 : approximation d'un quartier réel par un quartier générique équivalent

S'agissant des besoins de chauffage la transformation du quartier réel en quartier générique équivalent conduit à des erreurs relatives (err_étape1) inférieures à 10% dans 84% des cas, et inférieure à 5% dans 42% des cas.

Les quartiers pour lesquels l'étape 1 induit une erreur relative supérieure à 10% sont les suivants : GINKO, KLEBER, FG2_9n_Or0, FG2_9n_Or30, FG4_3n_Or0, FG6_6n_Or0 et FG6_6n_Or30. Nous listons ci-dessous pour chaque quartier les principales raisons pour lesquelles le quartier équivalent tel que nous le définissons ne parvient pas à rendre compte des besoins thermiques du quartier réel :

- GINKO : ce quartier est le plus petit de notre corpus, il s'agit en fait d'un îlot dont la superficie est inférieure à 10000m². Les effets de moyenne sur lesquels reposent la validité du quartier équivalent ne s'appliquent pas. En outre, le quartier GINKO présente une forte variabilité en termes de hauteur des bâtiments et une structure spatiale très forte, avec une gradation des hauteurs selon un axe SO-NE.
- KLEBER : ce quartier présente également des hauteurs variées, mais surtout des orientations variées des façades de ses bâtiments. Il est difficile de définir deux directions préférentielles orthogonales. De plus, la définition d'un périmètre rectangulaire (nécessaire pour l'application de notre méthode) pour ce quartier qui présente un plan non rectangulaire induit une surestimation des surfaces au sol hors emprise au sol des bâtiments et donc une surestimation de la largeur des rues pour le quartier équivalent.
- FG2_9n_Or0 et FG2_9n_Or30 : FG2 étant un quartier de type bloc, la non représentativité du quartier équivalent est plus étonnante. Elle se manifeste pour la forme FG2 lorsque le nombre

d'étage est important (9 étages), et ceci est dû au fait que les trois bâtiments les plus au sud ont des besoins de chauffage beaucoup plus faibles que les autres. A cause de ces effets de bord, le bâtiment central du quartier équivalent ne représente pas bien le quartier réel.

- FG4_3n_Or0, FG6_6n_Or0 et FG6_6n_Or30 : pour ces trois quartiers, il est difficile de déterminer avec certitude les raisons de la non représentativité du quartier équivalent. On constate néanmoins que la majorité des cas d'étude construits sur la base de FG4 et de FG6 sont assez mal représentés par leurs quartiers équivalents, ceci étant encore une fois probablement dû aux effets de bord. Le nombre de bâtiments est faible pour ces cas d'étude (9 bâtiments), et comme pour FG2_9n, les trois bâtiments les plus au sud ont des besoins de chauffage beaucoup plus faible que les autres. Une seconde raison réside sûrement dans la complexité des formes des bâtiments.

En résumé, on peut à ce stade préciser des critères d'applicabilité de cette première étape en ce qui concerne les besoins de chaud. L'applicabilité de la méthode dépend notamment :

- De la taille de l'échantillon urbain : Au vu des tailles des différents quartiers testés, nous proposons la règle suivante : les dimensions de l'échantillon urbain doivent être supérieures à 150m dans les deux directions. Ce seuil pourrait être affiné par l'ajout de cas d'étude supplémentaires.
- Du nombre de bâtiments de l'échantillon urbain : Un nombre de bâtiments trop faible, invalide le recours à une approche moyenne telle que la nôtre.
- Du plan du quartier qui doit être proche d'un plan rectangulaire et doit présenter deux orientations préférentielles orthogonales suffisamment marquées pour les façades des bâtiments.
- La variabilité des hauteurs des bâtiments ne doit pas présenter une structure spatiale trop marquée à l'échelle de l'échantillon urbain.

Résultats de l'étape 2 : évaluation d'un quartier générique par métamodèle

S'agissant des besoins de chauffage, l'évaluation du quartier générique équivalent par métamodèle induit une erreur relative inférieure à 5% pour l'ensemble de notre corpus de cas d'étude. Cette erreur est même inférieure à 2% dans 78% des cas.

On observe le cas particulier de l'ensemble des déclinaisons de la forme FG6 pour lesquelles l'erreur est relativement élevée (3-4%). Il est difficile de se prononcer sur les raisons, mais c'est potentiellement dû au fait que les quartiers génériques équivalents aux formes FG6 sont proches des limites d'applicabilité du métamodèle. En effet les dimensions des blocs sont de 12m par 12m, alors que le métamodèle a été construit sur des blocs dont les dimensions sont comprises entre 8m et 70m (Tableau 46).

Résultats de l'ensemble de la méthode

S'agissant des besoins de chauffage, l'application de la totalité de la méthode (étape 1 + étape 2) induit une erreur relative inférieure à 10% dans 80% des cas, et inférieure à 5% dans 51% des cas.

L'objectif de notre approche n'est pas l'évaluation détaillée des besoins thermiques des bâtiments, mais la comparaison, le classement de formes urbaines en fonction de leur potentiel de chauffage passif et de confort d'été passif. Il est donc nécessaire de définir un critère de significativité pour la comparaison de deux résultats.

Nous définissons ainsi le seuil de significativité (ou résolution) de notre méthode comme la différence minimale de besoins de chauffage entre deux quartiers évaluées par notre méthode qui permet

d'assurer que le classement établi entre ces deux quartiers est le même que le classement obtenu sur la base des simulations EnergyPlus des quartiers réels.

Ce seuil de significativité est évalué à l'aide d'un script présent qui repose sur la comparaison deux à deux de l'ensemble des paires de quartiers de notre corpus de cas d'étude.

Le seuil de significativité ainsi déterminé est de 2,95 kWh/m². Cela signifie que deux quartiers évalués par notre approche pourront être classés en termes de besoins annuels de chauffage seulement si les résultats d'évaluation diffèrent de plus de 2,95 kWh/m². La Figure 79 présente le nombre de comparaisons significatives pour chaque quartier de notre corpus de cas d'étude. Cela se traduit par le fait que 44% des comparaisons deux à deux sont significatives.

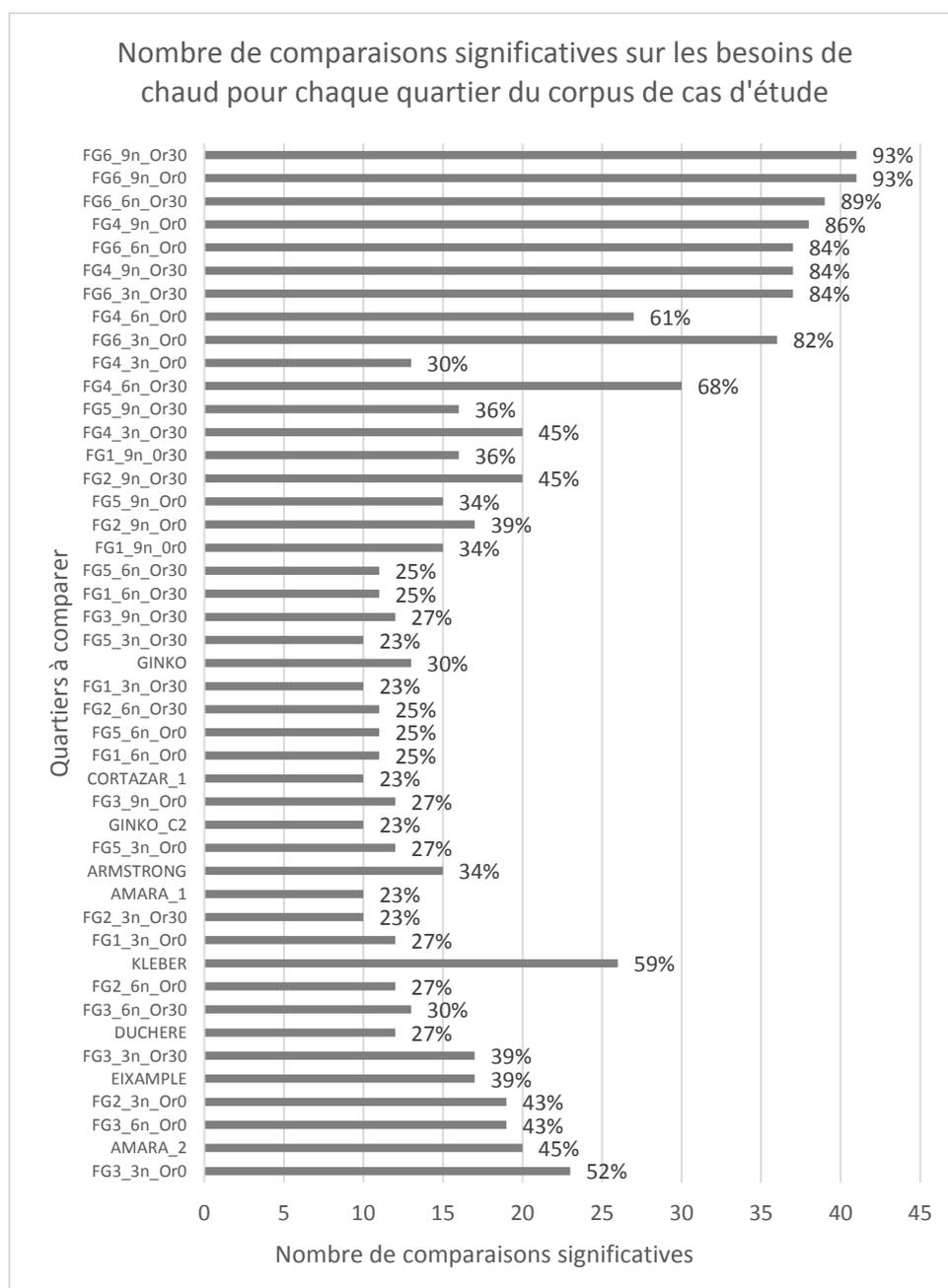


Figure 79 - Nombre de comparaisons significatives pour le corpus de cas d'étude complet

Nous procédons maintenant à la même analyse, mais sur la base d'un corpus de cas d'étude réduit à 34 quartiers du fait de l'application des critères d'applicabilité définis plus haut ; c'est-à-dire en retirant de notre corpus initial les quartiers pour lesquels $err_étap1$ est supérieure à 10%, ainsi que l'ensemble des déclinaisons de la forme FG6 qui sont trop proches des limites d'applicabilité du métamodèle (étape 2 non applicable). Sur ce corpus réduit, l'erreur relative totale est inférieure à 10% dans 94% des cas, et inférieure à 5% dans 44% des cas. Tout en gardant en tête que les corpus de cas d'étude sont différents, ces résultats sont à mettre en relation avec les résultats de Nault et al. (2017) qui ont construit des métamodèles des besoins thermiques d'un quartier (chaud et froid) sur la base de paramètres morphologiques et des résultats d'irradiation solaires. Malgré une approche très différente, les auteurs obtiennent des résultats similaires aux nôtres avec une erreur de prédiction inférieure à 10% dans 87% des cas.

Le seuil de significativité obtenu pour ce corpus réduit est de $1,1 \text{ kWh/m}^2$. Il est largement amélioré par rapport au cas précédent. Cela signifie qu'en appliquant des critères d'applicabilité tels que définis plus haut, notre approche permet de classer deux quartiers en termes de besoins annuels de chauffage si leurs résultats d'évaluation diffèrent de plus de $1,1 \text{ kWh/m}^2$. La Figure 80 présente pour ce corpus réduit de cas d'étude le nombre de comparaisons significatives pour chaque quartier du corpus de cas d'étude réduit. Pour ce corpus réduit, 63% des comparaisons deux à deux sont significatives.

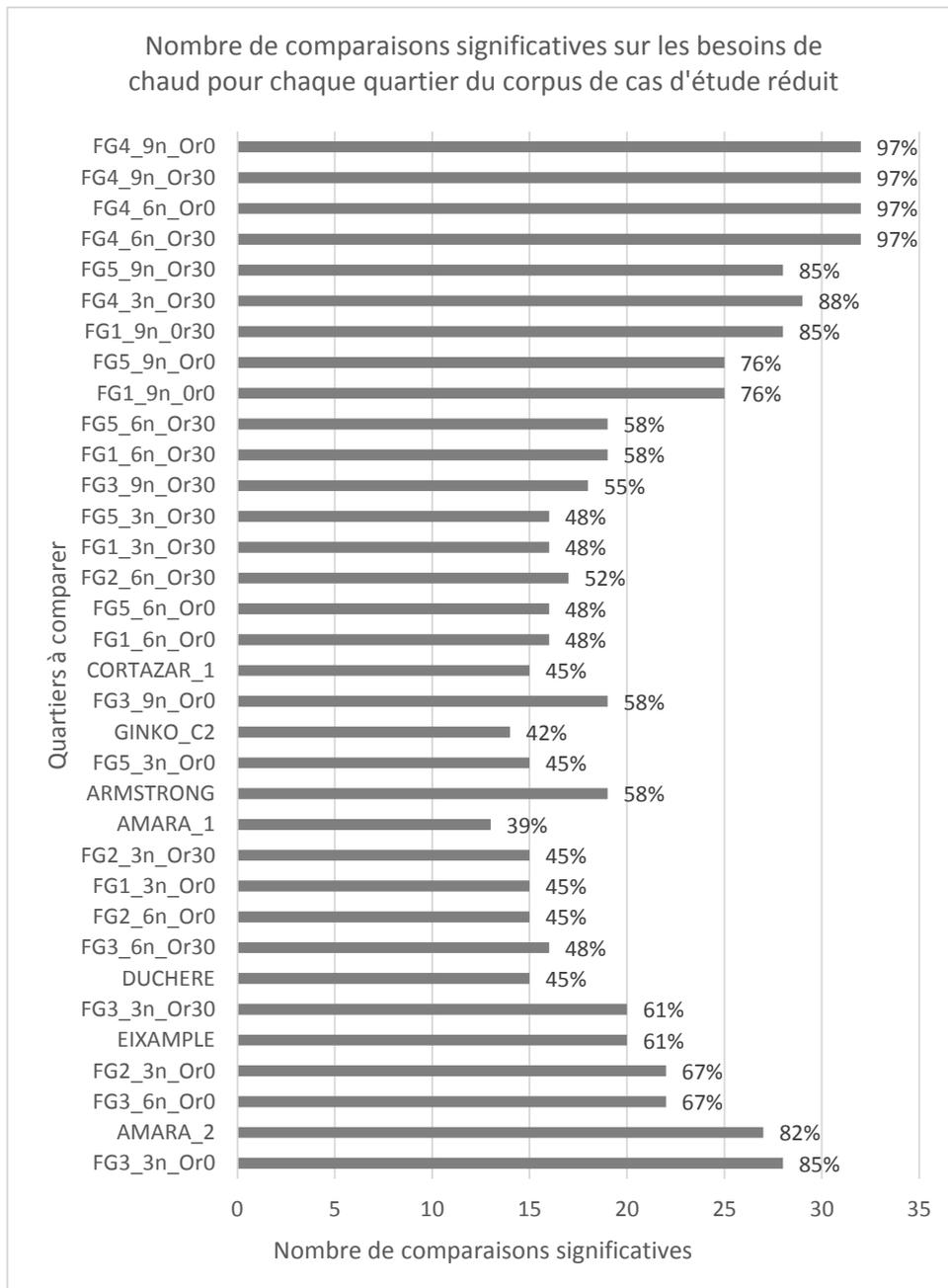


Figure 80 – Nombre de comparaisons significatives pour le corpus de cas d'étude réduit

6.4.3.2. Analyse sur les besoins de froid

Résultats de l'étape 1 : approximation d'un quartier réel par un quartier générique équivalent

S'agissant des besoins de froid, la transformation du quartier réel en quartier générique équivalent conduit à des erreurs relatives ($err_{\text{étape1}}$) inférieures à 10% dans 93% des cas, et inférieure à 5% dans 58% des cas.

Les quartiers pour lesquels l'étape 1 induit une erreur relative supérieure à 10% sont les suivants : GINKO, FG6_6n_Or0 et FG6_9n_Or0. Nous listons ci-dessous pour chaque quartier les principales raisons pour lesquelles le quartier équivalent tel que nous le définissons ne parvient pas à rendre compte des besoins thermiques du quartier réel :

- GINKO : les raisons sont les mêmes que pour les besoins de chaud.

- FG6_6n_Or0 et FG6_9n_Or30 : pour ces deux quartiers, il est difficile de déterminer avec certitude les raisons de la non représentativité du quartier équivalent. C'est encore une fois probablement dû aux effets de bord. Le nombre de bâtiments est faible pour ces cas d'étude (9 bâtiments), et les trois bâtiments les plus au sud ont des besoins de froid beaucoup plus importants que les autres. Une seconde raison réside sûrement dans la complexité des formes des bâtiments.

Les critères d'applicabilité définis plus haut pour les besoins de chaud s'appliquent également pour l'évaluation des besoins de froid.

Résultats de l'étape 2 : évaluation d'un quartier générique par métamodèle

S'agissant des besoins de froid, l'évaluation du quartier générique équivalent par métamodèle induit une erreur relative inférieure à 10% dans 96% des cas et inférieure à 5% dans 80% des cas. On constate à ce stade que la métamodélisation des besoins de froid sur notre corpus de cas d'étude est moins performante que la métamodélisation des besoins de chaud, en accord avec les performances des métamodèles observées sur leur base de validation.

On observe le cas particulier de l'ensemble des déclinaisons de la forme FG2 pour lesquelles les erreurs sont importantes. Il est difficile de se prononcer sur les raisons, mais c'est potentiellement dû au fait que les quartiers génériques équivalents aux formes FG2 sont proches des limites d'applicabilité du métamodèle. En effet les dimensions des blocs sont de 70m par 10m, alors que le métamodèle a été construit sur des blocs dont les dimensions sont comprises entre 8m et 70m (Tableau 46).

Résultats de l'ensemble de la méthode

S'agissant des besoins de froid, l'application de la totalité de la méthode (étape 1 + étape 2) induit une erreur relative inférieure à 10% dans 80% des cas, et inférieure à 5% dans 49% des cas.

De même que pour les besoins de chaud, nous déterminons le seuil de significativité de notre méthode. Ce seuil de significativité est de 4,15 kWh/m². Cela signifie que deux quartiers évalués par notre approche pourront être classés en termes de besoins annuels de froid seulement si les résultats d'évaluation diffèrent de plus de 4,15 kWh/m². La Figure 81 présente le nombre de comparaisons significatives pour chaque quartier de notre corpus de cas d'étude. Cela se traduit par le fait que 33% des comparaisons deux à deux sont significatives.

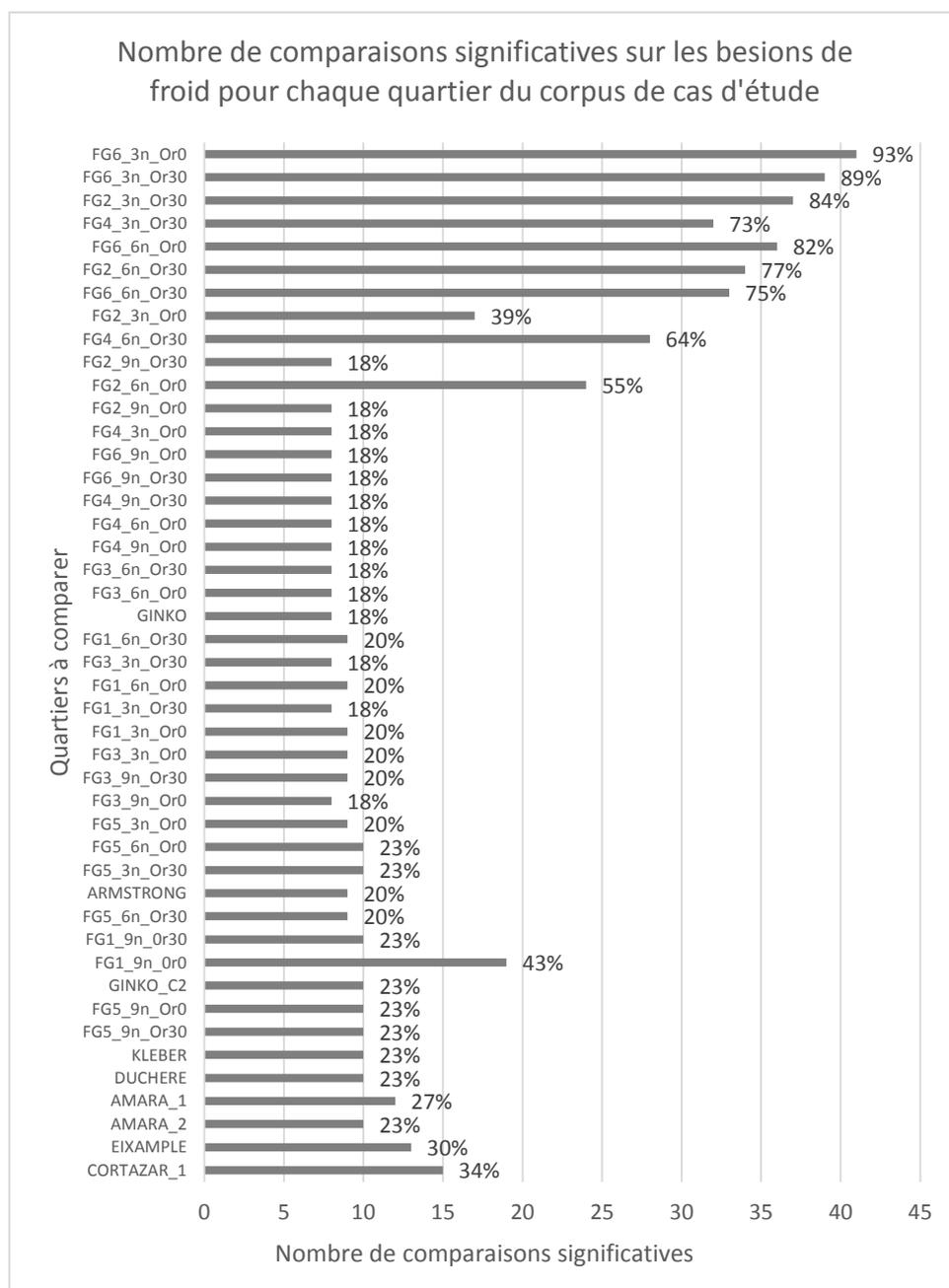


Figure 81 - Nombre de comparaisons significatives sur les besoins de froid pour le corpus de cas d'étude complet

Nous procédons maintenant à la même analyse, mais sur la base d'un corpus de cas d'étude réduit à 36 quartiers du fait de l'application des critères d'applicabilité définis plus haut ; c'est-à-dire en retirant de notre corpus initial les quartiers pour lesquels *err_étap1* est supérieure à 10%, ainsi que l'ensemble des déclinaisons de la forme FG2 qui sont trop proches des limites d'applicabilité du métamodèle (étape 2 non applicable). Sur ce corpus réduit, l'erreur relative totale est inférieure à 10% dans 94% des cas, et inférieure à 5% dans 33% des cas.

Le seuil de significativité obtenu pour ce corpus réduit est de 1,6 kWh/m². Il est largement amélioré par rapport au cas précédent. Cela signifie qu'en appliquant des critères d'applicabilité tels que définis plus haut, notre approche permet de classer deux quartiers en termes de besoins annuels de froid si leurs résultats d'évaluation diffèrent de plus de 1,6 kWh/m². La Figure 82 présente pour ce corpus

réduit de cas d'étude le nombre de comparaisons significatives pour chaque quartier. Pour ce corpus réduit, 66% des comparaisons deux à deux sont significatives.

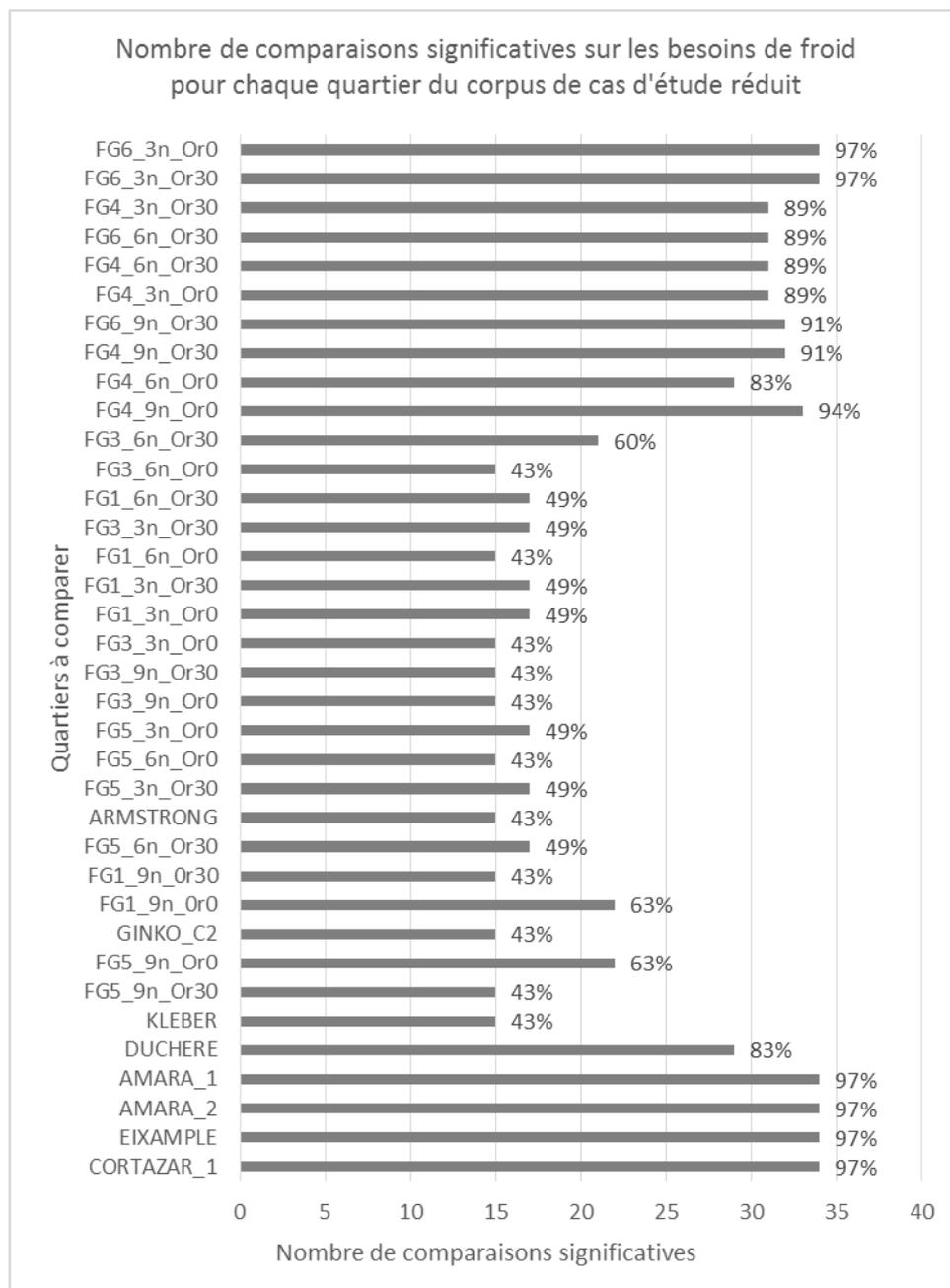


Figure 82 – Nombre de comparaisons significatives sur les besoins de froid pour le corpus de cas d'étude réduit

6.4.3.3. Classement multicritère de notre corpus de cas d'étude

Dans cette section nous proposons les résultats d'évaluation de notre corpus de cas d'étude pour les quatre critères pour lesquels nous avons développé des méthodes d'évaluation, à savoir l'énergie grise et l'empreinte carbone (chapitre 4), les besoins de chaud et les besoins de froid (chapitre 6). Les résultats sont présentés sur les quartiers pour lesquels les évaluations des besoins thermiques sont applicables, c'est-à-dire sur un échantillon réduit de 30 cas d'étude. Sur cet échantillon réduit, la variabilité (deux fois l'écart type divisé par la moyenne) est de 39%, 33%, 32% et 43% respectivement pour l'énergie grise, l'empreinte carbone, les besoins de chaud et les besoins de froid.

La Figure 83 présente l'ensemble de ces résultats. Dans un souci de lisibilité de ce diagramme radar, pour chaque série, les valeurs sont divisées par la moyenne de la série. L'épaisseur des traits concernant les besoins de chaud et de froid traduit les seuils de significativité respectifs pour ces critères (lorsque la différence entre deux quartiers est inférieure à l'épaisseur du trait, le critère n'est pas discriminant).

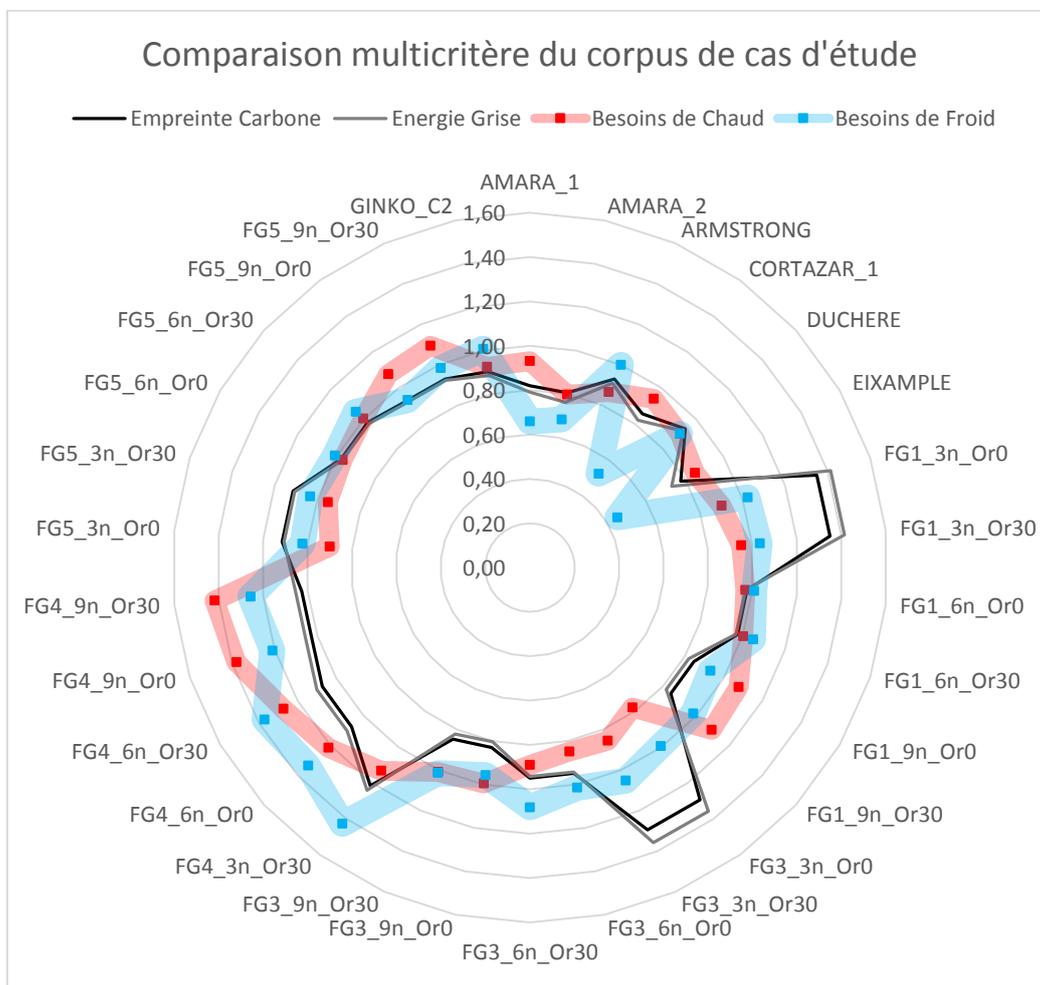


Figure 83 - Diagramme radar, évaluation multicritère du corpus de cas d'étude

Sur ce diagramme apparaissent notamment des quartiers plus performants que la moyenne sur l'ensemble des critères ; AMARA_1, AMARA_2, ARMSTRONG, CORTAZAR, DUCHERE, EIXAMPLE, FG3_9nOr0 et FG3_9n_Or30. On identifie également des quartiers particulièrement défavorables du point de vue de l'énergie grise et de l'empreinte carbone ; FG1_3n_Or0, FG1_3n_Or30, FG3_3n_Or0, FG3_3n_Or30, et FG4_3n_Or30. Il s'agit de quartiers présentant des bâtiments de faible hauteur (3 étages). On voit enfin que l'ensemble des déclinaisons de la forme générique FG4 sont défavorables à la fois en termes de besoins de chaud et de besoins de froid.

A titre illustratif de la capacité de ces méthodes à évaluer et classer des formes urbaines variées, le Tableau 50 présente le classement pour l'ensemble des quartiers lorsque le même poids est accordé aux quatre critères. L'établissement de ce classement se fait par sommation des rangs des quartiers dans les classements relatifs à chacun des quatre indicateurs considérés.

CLASSEMENT DES CAS D'ETUDE
du plus performant au moins performant

EIXAMPLE	1	FG3_6n_Or0	11	FG5_6n_Or30	21
AMARA_2	2	FG3_9n_Or30	12	FG1_3n_Or0	22
AMARA_1	3	FG5_9n_Or0	13	FG3_3n_Or30	23
CORTAZAR_1	4	FG5_9n_Or30	14	FG5_3n_Or30	24
FG3_9n_Or0	5	FG1_6n_Or0	15	FG1_3n_Or30	25
ARMSTRONG	6	FG3_6n_Or30	16	FG4_9n_Or0	26
FG1_9n_Or0	7	FG3_3n_Or0	17	FG4_6n_Or0	27
DUCHERE	8	FG5_6n_Or0	18	FG4_9n_Or30	28
GINKO_C2	9	FG1_6n_Or30	19	FG4_6n_Or30	29
FG1_9n_Or30	10	FG5_3n_Or0	20	FG4_3n_Or30	30

Tableau 50 - Classement des cas d'étude pour l'ensemble des quatre critères (même poids accordé à chaque critère)

6.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté et testé une approche simplifiée de modélisation des besoins de chaud et de froid des bâtiments à l'échelle d'un quartier. Cette approche a vocation à être utilisée soit pour comparer des scénarios d'aménagement ou de rénovation urbaine, soit pour évaluer les potentiels de chauffage passif et de confort d'été passif de formes urbaines existantes.

Cette approche en deux étapes repose sur la transformation du quartier à évaluer en un quartier générique équivalent du point de vue des besoins thermiques, puis sur l'évaluation des besoins thermiques du quartier équivalent via des métamodèles du moteur de simulation thermique dynamique EnergyPlus que nous avons développés.

Le test de notre approche sur un corpus de 45 cas d'étude, représentatifs d'une grande diversité de formes urbaine, nous a permis dans un premier temps d'établir des critères d'applicabilité de la méthode. Ces critères concernent la dimension de l'échantillon urbain à évaluer, le nombre de bâtiments le composant, ainsi que sa structure (existence ou non d'orientations préférentielles, rectangularité du plan, structuration spatiale de la variabilité des hauteurs de bâtiments, etc.). Nous les avons définis de manière qualitative sur la base de notre corpus de cas d'étude, l'enrichissement de ce corpus par de nouveaux cas, pourrait permettre de préciser davantage ces critères. Dans un second temps, et en utilisant ces critères d'applicabilité pour réduire notre corpus de cas d'étude, nous avons déterminé les seuils de significativité de nos évaluations en termes de besoins de chaud et de besoins de froid. Les différences de besoins de chaud évaluées par cette approche sont significatives dès lors qu'elles sont supérieures à 1,1 kWh/m².an. Ce seuil est de 1,6 kWh/m².an en ce qui concerne les besoins de froid. Ces résolutions nous permettent des comparaisons significatives entre deux quartiers dans deux tiers des cas, sur les besoins de chaud comme sur les besoins de froid. L'ajout de nouveaux cas d'étude permettrait également de consolider ces seuils de significativité.

Les options de développement de cette méthode ont été fortement guidées par des contraintes d'opérationnalité en vue de son intégration dans l'outil NEST, outil simplifié d'évaluation des impacts environnementaux à l'échelle du quartier. Notamment l'idée du recours à une base de données de métamodèles provient de la nécessité de s'abstraire d'outils de simulation pour proposer des évaluations en temps réel. Le développement a également été éclairé par l'analyse du bilan thermo-radiatif que nous avons présenté au chapitre précédent pour deux cas d'étude. Cette analyse a notamment permis de pointer la nécessité de développer une méthode qui soit sensible aux orientations des façades, qui prenne en compte les inter-réflexions et qui soit sensible aux variations d'albédo des différentes surfaces de la scène urbaine.

La méthode que nous proposons présente bien sûr des limites parmi lesquelles la non prise en compte de la végétation dont l'analyse du chapitre précédent avait fait ressortir l'importance. Une autre limite réside dans la non prise en compte des échanges GLO au sein de la scène urbaine. Toutefois l'analyse menée au chapitre 5 a permis de montrer que son influence sur les déperditions thermiques en hiver est limitée. En été son influence sur les déperditions thermiques est significative mais reste relativement limitée par comparaison avec l'amplitude des apports solaires.

Enfin, nous avons dans le cadre de ce travail établi des métamodèles pour les besoins de chaud et de froid de bâtiments résidentiels collectifs correctement isolés (ce qui se traduit par des hypothèses notamment en termes de composition des façades, toits, etc.), et applicable dans la seule zone H2c de la réglementation thermique. Notre méthode n'est donc applicable que pour des quartiers très majoritairement constitués de bâtiments résidentiels collectifs de type RT2012. L'application à des quartiers mixtes nécessiterait de nouveaux développements et la couverture nationale par notre approche nécessitera le développement de métamodèles pour les sept autres zones géographiques de la réglementation thermique.

Chapitre 7. Discussion générale et conclusion

7.1. DISCUSSION GENERALE

Dans cette section nous proposons tout d'abord une discussion de nos résultats au regard de nos hypothèses et objectifs initiaux, puis nous proposons une stratégie d'intégration de nos développements dans l'outil NEST.

7.1.1. Discussion des résultats

Nos travaux de thèse ont visé à démontrer d'une part qu'il est pertinent d'enrichir l'ACV de l'environnement bâti à l'échelle du quartier par la prise en compte de l'influence de la forme urbaine sur les potentiels énergétiques du quartier, et d'autre part qu'il est possible de proposer sur cette thématique un outil d'aide à la décision adapté aux phases amonts de conception (établissement du plan masse) des opérations d'aménagement. La réponse à cette seconde interrogation devait intégrer de fortes contraintes d'opérationnalité, liées principalement à la phase à laquelle nous souhaitons pouvoir évaluer les projets (peu de données disponibles, peu de ressources, nécessité de pouvoir comparer rapidement des alternatives), mais également liées à l'intégration future de nos travaux dans l'outil NEST (évaluation en temps réel, non-recours à des moteurs de simulation).

Cette question découlait de l'objectif général sous-tendant nos travaux et formulé par NOBATEK/INEF4, à savoir la volonté de proposer aux équipes de conception d'opérations d'aménagement des moyens de prise en compte de l'influence de la forme urbaine sur les potentiels énergétiques d'un quartier avec perspective cycle de vie.

Dans cette section, nous discutons nos principaux résultats au regard des hypothèses que nous avons formulées au Chapitre 1 et des sous-objectifs que nous nous sommes fixés pour atteindre notre objectif principal.

7.1.1.1. L'application de l'ACV en phase amont de conception de projets d'aménagement

La première hypothèse sous-tendant nos travaux concernait la pertinence de l'ACV appliquée à l'échelle du quartier pour l'aide à la conception d'une opération d'aménagement, et ce dès la phase esquisse. Nous faisons également l'hypothèse que la difficulté de prise en compte de la forme urbaine était une des limites majeures pour ce type d'application.

Pour statuer sur cette hypothèse, notre premier sous-objectif consistait à réaliser une revue critique sur l'application de l'ACV à l'évaluation de l'environnement bâti à l'échelle du quartier, et ce afin d'en dégager les pratiques actuelles, les défis méthodologiques et les besoins de recherche pour informer nos propres développements.

Nous avons ainsi analysé 21 cas d'étude publiés, selon des critères relatifs aux quatre phases d'une ACV. Cette revue critique a mis en premier lieu en évidence la pertinence de l'ACV pour l'évaluation de la performance environnementale de l'environnement bâti à l'échelle du quartier. Les usages principaux qui en sont fait sont i. l'évaluation de quartiers existants ou de quartiers modèles pour éclairer les stratégies de développement urbain, et ii. l'évaluation de projets d'aménagement en phase amont de conception. Dans les deux cas, l'ACV peut être mobilisée dans une logique d'aide à la décision. Cette aide à la décision vise souvent les grandes orientations relatives aux bâtiments, telles que l'exploration d'alternatives en matière de systèmes constructifs ou d'équipements (systèmes de chauffage ou équipement de production d'EnR). Or il est intéressant de rappeler que ces types d'orientations ne relèvent pas du projet d'aménagement, mais de la conception des bâtiments. Plus rarement le cadre méthodologique de l'ACV est mobilisé pour l'étude de la performance environnementale d'alternatives en matière de forme urbaine. Nous avons également mis en évidence

une forte concentration des études sur les thématiques relatives à l'énergie. La plupart d'entre elle n'exploitent pas le caractère multicritère de l'ACV, mais se focalisent sur deux indicateurs : la demande d'énergie cumulée et le changement climatique. Notre analyse révèle également une grande hétérogénéité des choix méthodologiques et ce à toutes les phases de l'ACV, ce qui rend impossible la comparaison des résultats des différentes études de cas. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux modes d'obtention des données d'inventaire relatives aux deux contributeurs principaux du cycle de vie des bâtiments, à savoir les matériaux de construction et les consommations d'énergie en phase d'usage. Il nous est alors apparu que les approches et outils les plus simples et compatibles en matière de données avec l'évaluation d'un plan masse de projet d'aménagement sont souvent insensibles à la forme urbaine, qui constitue pourtant un des principaux leviers d'action à ce stade des projets sur la performance énergétique du futur quartier.

Cette revue critique aura donc permis de valider notre première hypothèse. Nous avons mis en évidence l'intérêt de l'ACV pour l'aide à la décision sur les projets d'aménagement en phase amont de conception. Nous avons également montré que l'un des enjeux majeurs pour produire de l'information utile aux concepteurs urbains réside dans le développement de la prise en compte de la forme urbaine dans les évaluations, et ce notamment concernant les deux contributeurs majeurs aux impacts environnementaux des bâtiments que sont les matériaux de construction et les consommations d'énergie en phase d'usage. D'un point de vue plus opérationnel, il n'existe pas à l'heure actuelle, d'outil d'ACV à l'échelle du quartier, qui soit compatible avec les phases amont de conception de projet d'aménagement, et qui permette de prendre en compte l'influence de la forme urbaine.

7.1.1.2. L'influence des leviers de conception de l'urbaniste sur les potentiels énergétiques du quartier

Notre second sous-objectif consistait à expliciter l'influence des leviers de conception du projet d'aménagement, notamment la forme urbaine, le choix des types de surfaces minérales et les stratégies de végétalisation, sur les potentiels énergétiques du projet à l'échelle du quartier. Nous cherchions alors à statuer sur notre hypothèse selon laquelle les interactions entre le projet d'aménagement et le climat local constituent un élément de contexte important dont la prise en compte est nécessaire dès la phase d'établissement du plan masse d'une opération d'aménagement. Pour y répondre nous avons d'une part réaliser un état de l'art sur la thématique des interactions entre forme urbaine, climat et énergie, et d'autre part nous avons proposé une étude détaillée du bilan énergétique de la surface urbaine pour deux cas d'étude, un écoquartier et un projet de renouvellement urbain d'un grand ensemble.

Notre état de l'art nous a permis d'explorer les approches de modélisation du microclimat urbain à l'échelle du quartier, ainsi que les approches d'intégration de la physique urbaine dans la modélisation thermique des bâtiments. Ces approches relèvent de l'expertise scientifique et technique et ne peuvent pas en l'état constituer des outils d'aide à la décision appropriables par les concepteurs urbains. Par ailleurs, les résultats d'études les mettant en œuvre soulignent la difficulté à hiérarchiser l'influence relative des différents leviers de conception de l'urbaniste sur les potentiels énergétiques d'un quartier. Nous nous sommes également intéressés à la voie des études morphologiques qui sur la seule base de paramètres morphologiques tente de proposer des lois ou principes permettant d'évaluer une forme urbaine. L'une des motivations principales de ce type d'approche réside dans la volonté de développer des outils d'aide à la décision relativement à l'influence de la forme urbaine sur les performances environnementale et énergétique du tissu urbain. Cependant il apparaît en pratique que l'interprétation des indicateurs issus de ces développements est peu aisée et très dépendante du contexte. Une interprétation fiable n'est souvent possible qu'à posteriori, c'est-à-dire sur la base d'une étude détaillée des formes urbaines que l'on souhaite comparer, et mettant en œuvre

des approches de modélisation. Autrement dit, ces indicateurs peuvent s'avérer très puissants pour expliquer a posteriori la performance d'une forme urbaine, ou pour évaluer des variantes supplémentaires dans un espace de conception déjà bien connu, c'est-à-dire sur lequel on a été capable d'établir des lois sur la base de ces indicateurs. L'ensemble des recherches montrent que l'usage d'indicateurs morphologiques pour l'évaluation a priori des formes urbaines n'est pas effective.

Cet état de l'art nous aura également permis d'explicitier les mécanismes physiques de la dépendance des potentiels énergétiques d'un quartier à la forme urbaine (géométrie et types de surfaces). Pour compléter cette compréhension et pour tâcher de dégager des enseignements valables dans le contexte français et pour deux types d'opérations d'aménagement typiques à l'échelle du quartier (écoquartier et renouvellement urbain), nous avons réalisé à l'aide du logiciel SOLENE une étude détaillée du bilan énergétique de surface pour deux cas d'étude et leurs variantes mettant en œuvre des modifications de la géométrie urbaine, de l'albédo des surfaces minérales, et de stratégie de végétalisation.

Cette étude nous a renseignés sur l'importance relative des différents phénomènes physiques à l'œuvre et notamment au regard de la thermique du bâtiment. Nous avons notamment pu mettre en évidence : la faible sensibilité du flux conductif au travers des parois opaques (déperditions ou apertions thermiques) aux conditions de vent dans la scène urbaine ; l'importance des inter-réflexions CLO au sein de la scène urbaine qui sont souvent du même ordre de grandeur que le flux solaire diffus ; l'importance des échanges GLO au sein de la scène urbaine qui cependant ont peu d'influence sur le flux conductif.

Relativement au développement d'une approche simplifiée d'évaluation du potentiel de chauffage passif et du risque de surchauffe estivale des bâtiments à l'échelle du quartier les principaux enseignements que nous avons tirés de cette étude sont les suivants :

- Dans le cas de bâtiments correctement isolés, le flux conductif au travers des parois opaques et les apports solaires en cumul journalier sont du même ordre de grandeur (rapportés au m² de plancher). Ces deux dimensions doivent donc être considérées, et l'on ne peut pas traiter uniquement des apports solaires.
- En matière d'apport solaires, il est nécessaire de prendre en compte les inter-réflexions en plus des flux solaires directs et diffus.
- S'agissant du flux conductif, nous avons constaté qu'il est toujours un ordre de grandeur plus faible que les flux externes (flux solaire absorbé, flux GLO et flux convectif). Ses variations sont quant à elles un à deux ordres de grandeur plus faibles que les variations des flux externes. L'équilibre à la surface extérieure des bâtiments est donc principalement un équilibre entre le flux solaire absorbé, le flux convectif et le flux GLO total. Il apparaît donc impossible de développer une approche d'évaluation des potentiels thermiques des bâtiments sur la base d'évaluations approchées de leurs sollicitations microclimatiques.

En second lieu, nous avons étudié l'influence relative de différents leviers de conception propres au projet d'aménagement sur les potentiels bioclimatiques d'un quartier. Pour les variations testées et les potentiels bioclimatiques étudiés nous avons montré que les variations d'albédo et les stratégies de végétalisation du bâtiment ont des effets très importants, et notamment plus importants que des variations de hauteur des bâtiments (+2 étages) ou des variations d'orientation des bâtiments (+/-15°). Les variations d'albédo ont une influence significative sur l'ensemble des thématiques étudiées. Les stratégies de végétalisation des bâtiments (façades et toits végétaux) ont une influence significative sur le potentiel de chauffage passif, le potentiel de confort d'été passif et l'îlot de chaleur urbain. Les albédos et la végétalisation peuvent dans une certaine mesure être prescrits au stade du projet

d'aménagement au travers de la conception des espaces publics et au travers de cahiers de prescriptions architecturales et environnementales. Ils apparaissent donc comme des leviers importants qui doivent être mobilisés à ce stade des projets pour une prise de décision éclairée au même titre que les considérations sur la forme urbaine (trame viaire et gabarits des bâtiments).

Nous avons mené notre analyse sur deux cas d'étude représentatifs de deux grands types d'opérations d'aménagement rencontrées dans le contexte français, et travaillant à l'échelle du quartier. Malgré cette recherche de représentativité, il est important de souligner que nos résultats restent dépendants des cas d'étude sélectionnés, ainsi que des hypothèses de modélisation notamment en matière de systèmes constructifs, de niveaux d'isolation, de localisation et de données météorologique utilisées. Il serait intéressant pour la suite d'étudier les niveaux d'incertitude associés à ces hypothèses de modélisation. Par ailleurs nos résultats ont été obtenus via des simulations thermo-radiatives, sans prise en compte du couplage thermo-aéraulique entre la surface urbaine et l'air extérieur. Il serait intéressant de mener la même étude avec une simulation couplée pour étudier dans quelle mesure les déperditions et apertures thermiques des bâtiments s'en trouvent modifiées.

7.1.1.3. Développement d'un modèle d'évaluation de l'énergie grise des bâtiments à l'échelle du quartier

Sur la base des quelques références existantes, nous avons fait l'hypothèse que la prise en compte de la forme urbaine (et notamment de la forme des bâtiments) est nécessaire pour l'évaluation de l'énergie grise et de l'empreinte carbone d'un quartier en phase amont de conception. Nous postulons également qu'il était pertinent pour des évaluations à l'échelle du quartier de développer une approche intermédiaire entre les approches existantes à cette échelle et les approches à l'échelle du bâtiment.

Dans une optique d'intégration de l'influence de la forme urbaine dans les ACV de quartiers nous avons donc proposé une méthodologie d'évaluation de l'énergie grise des bâtiments capable de rendre compte de l'influence de la forme urbaine et compatible avec la phase esquisse d'un projet d'aménagement urbain. Nous avons ensuite mis à profit ce modèle pour réaliser une étude détaillée de l'influence de la forme des bâtiments sur leurs niveaux d'énergie grise et leur empreinte carbone. Cette étude nous a permis de valider notre hypothèse. Nous avons pu mettre en évidence que la forme du bâtiment peut être plus influente que la composition des différents éléments fonctionnels le composant. La prise en compte de la forme des bâtiments pour l'évaluation, même approchée, de son énergie grise et de son empreinte carbone est donc nécessaire. En accord avec la littérature, nous avons montré que le nombre de niveaux (et à travers lui la hauteur des bâtiments) est le paramètre le plus influent. Cependant il n'explique par exemple que 54% de la variance sur l'énergie grise pour les types de bâtiments que nous avons testés. D'autres paramètres liés à la forme du bâtiment ; les dimensions de l'emprise au sol, la hauteur d'un étage et la densité de structure expliquent chacun entre 6% et 10% de la variance du modèle. La seule hauteur du bâtiment n'est donc pas un critère suffisant pour discriminer des bâtiments selon leurs niveaux d'énergie grise (et empreinte carbone). L'analyse de contribution a par ailleurs montré que les principaux contributeurs du bâtiment à l'énergie grise sont les planchers intermédiaires, les cloisons et la structure. Les principaux contributeurs à l'empreinte carbone sont les planchers intermédiaires et la structure. Partant de ces constats, nous nous sommes intéressés à la compacité des bâtiments comme indicateur morphologique pouvant renseigner sur l'énergie grise et l'empreinte carbone. La compacité définie comme le rapport de la surface d'enveloppe sur la surface plancher, s'est avérée être un bon proxy pour ce type d'évaluation. Cependant les lois empiriques qui peuvent être établies reliant compacité et impacts environnementaux pour des formes génériques de bâtiment sont dépendantes des formes en question

(bloc, cours, etc.). Cela questionne donc la possibilité du recours à ce type d'indicateur pour discriminer des formes réelles de bâtiments.

Très peu d'études ont été réalisées sur l'influence de la forme des bâtiments sur leur énergie grise (et empreinte carbone). Notre étude apporte des ordres de grandeurs sur les niveaux d'énergie grise (et empreinte carbone) pour deux formes de bâtiments génériques. Ainsi que des ordres de grandeur de leur variabilité au sein de l'espace de conception a priori accessible aux urbanistes travaillant sur des projets d'aménagement. Nous avons par ailleurs démontré dans le cas de bâtiments résidentiels collectifs en voile béton que la forme du bâtiment, au sein de cet espace de conception, est plus influente que les épaisseurs de béton et d'isolant. Enfin nous avons mis en avant le lien avec la compacité.

Nos travaux présentent des limites qu'il est utile de rappeler. Le modèle conceptuel que nous avons développé est répliquable à tout type de bâtiment, systèmes constructifs et contexte nationaux, mais nous l'avons appliqué dans le seul cas de bâtiments résidentiels collectifs en voile béton et dans le contexte français. Par ailleurs l'analyse de cycle de vie est par définition une méthode d'évaluation multicritère. Nous en avons proposé une approche monocritère en nous concentrant sur l'énergie grise et l'empreinte carbone. Enfin, le modèle prend en compte le dimensionnement des fondations en fonction de la forme du bâtiment. Par contre il ne prend pas en compte le dimensionnement de la superstructure, celle-ci étant définie par un paramètre (densité de structure).

Les perspectives pour la suite de ces travaux sont multiples. L'étude de l'influence sur les résultats du choix des systèmes constructifs apparaît prioritaire. Cela permettrait notamment l'étude des niveaux d'incertitude associés à la phase d'établissement du plan masse d'un projet d'aménagement, phase à laquelle les systèmes constructifs ne sont pas encore arrêtés. Même si d'un point de vue opérationnel, l'application de l'ACV au secteur de la construction se focalise très fortement sur la thématique énergétique, il serait intéressant d'ajouter des catégories d'impacts pour pouvoir étudier de potentiels *trade-offs* relatifs à la forme des bâtiments entre ces catégories d'impact. Enfin, l'étude des liens entre compacité et énergie grise (et empreinte carbone) pourrait être poursuivie pour explorer la possibilité de produire des données d'inventaire paramétrée par la compacité pour la phase de construction des bâtiments.

7.1.1.4. Développement d'un modèle d'évaluation des besoins thermiques des bâtiments à l'échelle du quartier

Toujours dans l'optique d'intégration de l'influence de la forme urbaine dans les ACV de quartier, nous avons développé une méthodologie d'évaluation des besoins de chaud et de froid à l'échelle du quartier capable de rendre compte de l'influence de la forme urbaine et compatible avec la phase esquisse d'un projet d'aménagement urbain. Cette méthodologie repose sur l'adaptation d'une méthode de transformation d'un quartier réel en quartier générique équivalent du point de vue des besoins thermiques, puis sur le développement de métamodèles du moteur de STD EnergyPlus pour l'évaluation des besoins thermiques du quartier équivalent. Nous avons testé et discuté cette approche sur 45 quartiers (cas d'étude). Cette analyse nous a permis de spécifier des critères d'applicabilité de la méthode, ainsi que des seuils de significativité des résultats d'évaluation. C'est-à-dire les seuils en-deçà desquels notre méthode n'est pas capable de discriminer deux quartiers selon leurs performances thermiques (besoins annuels de chaud et de froid). Cette approche simplifiée permet le classement des quartiers constituant notre corpus de cas d'étude selon leurs besoins de chaud et de froid dans respectivement 63% et 66% des comparaisons deux à deux (pour les quartiers vérifiant les critères d'applicabilité).

Les besoins annuels de chaud et de froid tels que nous les évaluons, résultent d'une modélisation simplifiée des bâtiments. Ces résultats ne doivent donc pas être considérés en valeur absolue, et ne permettent pas une évaluation des futures consommations d'énergie liées au chauffage ou à la climatisation. Il s'agit bien d'indicateurs du potentiel de chauffage passif et de confort d'été passif des bâtiments à l'échelle du quartier. Ces indicateurs doivent donc être utilisés dans une logique de score relatif. Du fait des bases de modélisation simplifiées, mais également du fait de la forte dépendance des consommations énergétiques finales aux choix de conception relatifs à chaque bâtiments (et qui interviennent bien plus en aval dans le développement d'un quartier), il ne nous apparaît donc pas possible d'utiliser les besoins ainsi évalués pour alimenter les données d'inventaire relatives à la phase d'usage des bâtiments. Ces indicateurs de potentiel de chauffage et de confort d'été passif ne peuvent donc pas en l'état alimenter directement une ACV de quartier, mais doivent être considérés comme une couche d'analyse supplémentaire traduisant la facilité ou la difficulté avec laquelle une forme urbaine permet d'atteindre des consommations énergétiques cibles relativement au chauffage et à la climatisation.

Nos travaux présentent des limites à la fois sur le fond et sur leur mise en pratique. Du point de vue de la modélisation de l'influence de la forme urbaine sur les besoins thermiques des bâtiments, il est utile de rappeler ici qu'une partie seulement des mécanismes au travers desquels cette influence s'exerce sont pris en compte. Les masques solaires (hors végétation) sont considérés pour l'évaluation des flux solaires direct et diffus. La géométrie de la scène urbaine est également prise en compte, ainsi que les albédos des sols et des bâtiments pour le calcul des inter-réflexions solaires. Les échanges radiatifs GLO entre les bâtiments et le sol sont pris en compte de manière simplifiée, et les échanges radiatifs GLO entre les bâtiments sont négligés. Il n'y a pas de couplage thermo-aéraulique, et l'effet d'ICU n'est donc pas pris en compte. Enfin notre approche ne permet pas de rendre compte du rôle de la végétation.

L'étape de transformation d'un quartier réel en quartier générique équivalent du point de vue des besoins thermiques notamment suppose de travailler avec des échantillons urbains rectangulaires ayant deux orientations principales orthogonales. Elle fait également l'hypothèse forte d'une iso-densité de bâtiments selon les deux axes principaux. De futurs travaux devraient s'attacher à surmonter ces contraintes. Par ailleurs, l'évaluation des quartiers génériques équivalents nécessite le développement d'une base de données de métamodèles pour différents types de bâtiments, différents systèmes constructifs et qui couvre les 8 zones climatiques françaises. La difficulté majeure identifiée ici réside dans le traitement de quartiers mixtes, c'est-à-dire incluent différents types de bâtiments.

S'agissant de la mise en pratique de notre approche, nous avons défini sur la base d'un corpus de cas d'étude des critères d'applicabilité et des seuils de significativité. Les critères d'applicabilité n'ont pu être formulés sur la base de cet échantillon que de manière qualitative, l'enrichissement du corpus de cas d'étude pourrait permettre d'opérationnaliser davantage ces critères en en proposant une formulation quantitative. L'ajout de cas d'étude permettrait également de consolider les seuils de significativité.

Ces travaux visaient à répondre à l'hypothèse selon laquelle l'analyse morpho-climatique d'une opération d'aménagement peut enrichir les données d'inventaire de la phase d'usage des bâtiments dès la phase d'établissement du plan masse d'une opération d'aménagement. Cette hypothèse ne s'est pas avérée entièrement valide. Nous avons effectivement développé une méthode d'évaluation des potentiels de chauffage passif et de confort d'été passif des bâtiments, applicable à l'échelle du quartier et en phase amont de conception d'un projet d'aménagement. Cette méthode fournit aux concepteurs urbains des informations utiles sur la capacité d'un aménagement à exploiter la ressource

solaire et à s'en protéger. De fait elle fournit des informations relatives à la phase d'usage des bâtiments. Cependant nous jugeons qu'il n'est pas pertinent *in fine* d'établir un lien direct entre les potentiels ainsi évalués et les consommations énergétiques (pour le chauffage et la climatisation) des bâtiments dont la forme exacte et les options techniques ne seront déterminées que plus tard dans le processus de conception.

7.1.2. Intégration des travaux dans NEST

Nos apports méthodologiques à l'évaluation environnementale de projets d'aménagements sont synthétisés à la Figure 84. Dans cette section nous discutons des possibilités d'intégration de ces apports dans l'outil NEST.

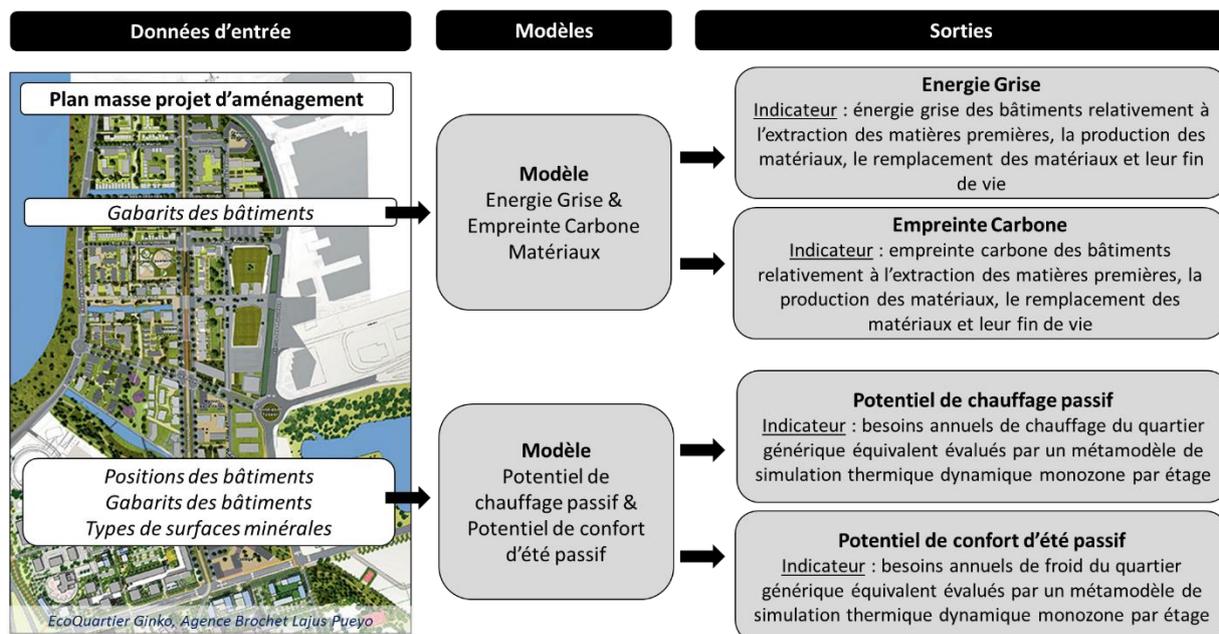


Figure 84 - Synthèse des apports méthodologiques pour l'évaluation environnementale de quartiers prenant en compte leur forme

L'outil NEST est particulièrement adapté à l'évaluation des projets en phase amont puisqu'il a été conçu spécifiquement pour exploiter les données disponibles à ce stade des projets. Cependant NEST permet également d'évaluer les performances de projets plus en aval dans le processus de conception en offrant la possibilité d'exploiter les nouvelles données disponibles du fait de l'avancement des projets. Cela se traduit par l'existence de deux modes de saisie des données projet :

- Un mode simplifié qui s'appuie sur des hypothèses et des données génériques facilitant la réalisation d'évaluations lorsque peu de données spécifiques sont disponibles. Ce mode permet d'illustrer les tendances de variations d'impacts potentiels entre plusieurs scénarios d'aménagement et donc d'accompagner les équipes du projet dans leurs choix de programmation ou de conception. Les résultats issus de ce mode de calcul sont particulièrement pertinents lorsqu'ils sont utilisés pour réaliser des comparaisons (logique de scores relatifs).
- Un mode détaillé qui autorise l'utilisation d'un plus grand nombre de données spécifiques à l'opération d'aménagement en fonction de son état d'avancement. Ce mode permet notamment d'utiliser des données issues de logiciels « experts » sur les thématiques des

impacts environnementaux des matériaux (lien avec le logiciel ELODIE⁷) et sur les aspects relatifs aux consommations d'énergie (lien avec Virtual Environment⁸ ou autres logiciels de STD/calculs réglementaires).

NEST permet donc de répondre à deux besoins principaux : faciliter la prise de décision en phase amont de projets (programmation, conception) par l'intermédiaire d'un mode de saisie simplifié ; évaluer des projets plus avancés voire livrés, en autorisant l'utilisation de données spécifiques et issues d'outils « experts » par l'intermédiaire d'un mode de saisie détaillé.

L'objet de cette section est de s'intéresser aux limites des méthodes d'évaluation du mode de saisie simplifié actuel et de formuler des propositions d'améliorations basées sur l'intégration des développements réalisés au cours de cette thèse.

7.1.2.1. Evaluation de l'énergie et des émissions grises de GES des matériaux de construction

Pour évaluer les impacts environnementaux (énergie primaire totale et changement climatique) des bâtiments, NEST s'appuie actuellement sur une base de données constituée à partir de cas d'études issus de projets réalisés par NOBATEK/INEF4 mais également de valeurs tirées de la littérature scientifique. Dans NEST, l'utilisateur caractérise les bâtiments depuis le modèle 3D (type, système constructif, équipements, etc.). Les surfaces de plancher de chaque bâtiment sont ensuite récupérées depuis le modèle et sont associées aux valeurs d'impacts de la base de données (exprimées respectivement en MJ/m²/an et kg_{eq} CO₂/m²/an).

La principale limite de cette méthode est qu'elle n'exploite pas l'ensemble des données géométriques relatives aux bâtiments, mais seulement les surfaces plancher. Cette approche ne permet donc pas de discriminer des scénarios de projet d'aménagement qui présente des formes urbaines différentes mais des surfaces plancher comparables.

Nous proposons donc ici d'implémenter le modèle développé au Chapitre 4 pour l'évaluation de l'énergie grise et des émissions grise de GES des bâtiments. Cette méthode est basée sur la décomposition des bâtiments en éléments fonctionnels dont les quantités peuvent être récupérées directement à partir du modèle 3D du quartier, et sur le développement d'une nouvelle base de données d'impacts environnementaux relatifs à chacun des éléments fonctionnels. L'implémentation de cette approche dans le cadre de nos travaux de thèse sur des bâtiments résidentiels collectifs en béton a conduit à considérer les éléments fonctionnels suivants : semelles, plancher bas du sous-sol, soubassement, structure du sous-sol, murs du sous-sol, plancher bas, planchers intermédiaires, toiture, murs extérieurs, fenêtres, structure, et cloisons. Ces éléments représentent de l'ordre de 60% de l'énergie grise et 70% des émissions de GES dues aux matériaux de construction dans les bâtiments résidentiels en béton. Dans la pratique du secteur de la construction, le bâtiment et ses abords sont divisés en 13 lots, dont la liste est présentée au

Tableau 52. Notre approche prend en compte les lots suivants :

- Lot 2 : fondations, infrastructures
- Lot 3 : Superstructure, maçonnerie
- Lot 4 : Couverture, étanchéité, charpente, zinguerie

⁷ Le CSTB et NOBATEK/INEF4 ont créé un lien entre NEST et ELODIE afin de permettre l'échange de données entre les deux outils. <https://boutique.cstb.fr/analyse-du-cycle-de-vie/355-elodie-nest.html> - Consulté le 18/05/2017.

⁸ Dans le cadre du projet européen RESSEPE (<http://www.ressepe-project.eu/>) NOBATEK/INEF4 a créé un lien entre l'outil NEST et le logiciel de STD Virtual Environment d'IES. NEST peut ainsi récupérer les données simulées par VE et les exploiter dans son évaluation environnementale.

- Lot 5 : Cloisonnement, doublage, plafonds suspendus, menuiseries intérieures
- Lot 6 : Façades, menuiseries extérieures

Afin d'affiner l'évaluation environnementale du mode simplifié de NEST il est nécessaire de compléter ces données afin de couvrir la quasi-totalité des matériaux constituant les bâtiments. Afin de couvrir les lots qui ne sont pas pris en compte par nos développements (par exemple les systèmes de chauffage, climatisation et ventilation, ou les installations sanitaires) nous proposons de nous appuyer sur plusieurs sources pour améliorer la précision de la valeur absolue des résultats d'impacts environnementaux calculés par l'outil :

- Les valeurs forfaitaires d'impacts environnementaux proposées par la méthode d'évaluation simplifiée du label d'état « Energie-Carbone »⁹ (Tableau 51). Ces valeurs forfaitaires sont disponibles pour les lots 8 à 12
- Des données environnementales de la base de données actuelle de NEST pour le lot 1 (voirie, réseaux divers) et le lot 13 (équipements de production d'électricité locale).
- Les résultats du test HQE Performance (Lebert et al. 2013) pour le lot 7 (revêtements de sols, murs, plafonds, chape, peintures, produits de décoration)

Le détail de la stratégie de couverture des différents lots est présenté au

Tableau 52.

Lots	Maison individuelle					Immeuble collectif					Bureau				
	8	9	10	11	12	8	9	10	11	12	8	9	10	11	12
Potentiel de réchauffement climatique ($\text{kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{m}^2 S_{\text{plancher}}$)	132	29	50	1	6	76	32	46	6	44	157	9	116	12	91
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire ($\text{MJ}/\text{m}^2 S_{\text{plancher}}$)	2323	730	1839	408	73	1823	720	1278	316	1130	2344	187	6931	927	1858

Tableau 51 – Valeurs forfaitaires des lots simplifiés issues de la méthode d'évaluation E+C-

LOTS		Décomposition en éléments fonctionnels	Valeurs forfaitaires label E+C-	BDD NEST actuelle	Valeurs test HQE 2012
1	Voirie, réseaux divers			X	
2	Fondations, infrastructures	X			
3	Superstructure, maçonnerie	X			
4	Couverture, étanchéité, charpente, zinguerie	X			
5	Cloisonnement, doublage, plafonds suspendus, menuiseries intérieures	X			
6	Façades, menuiseries extérieures	X			
7	Revêtements (sols, murs, plafonds), chape, peintures, produits de décoration				X
8	Chauffage, ventilation, climatisation		X		
9	Installations sanitaires		X		
10	Réseaux d'énergie (dont éclairage)		X		
11	Sécurité des personnes		X		
12	Appareils élévateurs		X		
13	Equipement de production d'électricité locale			X	

⁹ Afin de généraliser les bâtiments à énergie positive et à faible empreinte carbone, l'État français a lancé un label volontaire dédié à la valorisation de ces deux objectifs : le label Énergie + Carbone - (E+C-). <http://www.certivea.fr/offres/label-e-c>

Tableau 52 – Stratégie de couverture des lots de matériaux et systèmes proposée pour la nouvelle méthode d'évaluation de l'énergie et des émissions grise dans NEST (vert : couverture complète, orange : couverture partielle).

L'évaluation de l'énergie grise et des émissions grises des matériaux est alors réalisée principalement à partir des éléments issus des travaux de thèse, complétés par des données génériques robustes visant à consolider les valeurs absolues des impacts environnementaux calculés. Ainsi 100% des lots sont pris en compte dans l'évaluation. La majorité d'entre eux le sont de façon quasi-complète – les éléments représentatifs de la majorité des impacts du lot sont considérés (en vert dans le

Tableau 52) - alors que d'autres le sont de manière partielle – seuls quelques contributeurs sont pris en compte (en orange dans le

Tableau 52).

Cette nouvelle méthode de calcul permet donc d'exploiter au mieux les informations géométriques du modèles 3D en considérant l'influence de la forme des bâtiments sur les impacts environnementaux liés aux matériaux. Elle permet également de consolider les calculs d'impacts en termes de valeurs absolues. Il est important de préciser que la base de données environnementales constituée au Chapitre 4 concerne les bâtiments résidentiels en béton dans le contexte français. Il conviendrait donc de répliquer ces travaux pour d'autres types de bâtiments et modes constructifs afin d'assurer le développement complet de la base de données de l'outil NEST.

7.1.2.2. Evaluation des potentiels de chauffage passif et de confort d'été passif

En matière d'évaluation des consommations énergétiques des bâtiments, la double-mode de saisie de NEST se traduit par :

- Une approche simplifiée qui sur la base du niveau de performance visé (RT2005, RT2012, Effinergie+) ou de l'année de construction, propose des valeurs de consommation par m² et par an pour les bâtiments caractérisés (neufs ou existant). Ces valeurs sont ensuite retenues pour le calcul des impacts environnementaux.
- Une approche détaillée qui autorise l'import de valeurs de besoins ou de consommations spécifiques à chacun des bâtiments et issues d'outils de simulation thermique dynamique.

Si la deuxième approche permet d'utiliser les résultats produits par les équipes de maîtrises d'œuvre pour réaliser une évaluation fine des impacts environnementaux dus à la phase d'usage des bâtiments, la première a pour objectif de fournir des éléments facilitant la prise de décision en phase amont des projets.

Cette première approche se base donc sur le niveau de performance énergétique visé pour les bâtiments et sur les surfaces de plancher extraites du modèle 3D du quartier. La principale limite de cette méthode est qu'elle ne permet pas de tenir compte de la forme urbaine lors de la comparaison de plusieurs scénarios. Effectivement, dans le cas où deux variantes d'aménagement présentent des surfaces de plancher identiques et des caractérisations similaires pour chacun des bâtiments sur le plan des équipements et de la performance énergétique, les impacts environnementaux liés à la phase d'usage sont égaux et ne permettent pas de départager les deux scénarios. Or cette situation est courante en phase amont puisque les caractéristiques précises des équipements énergétiques ne sont souvent pas définies et les surfaces à construire sont encadrées par le programme de l'opération.

L'objet de cette section est de montrer comment nos travaux sur l'évaluation des potentiels de chauffage passif et de confort d'été passif peuvent être intégrés à NEST pour permettre la comparaison de scénarios d'aménagement sur la base de leur forme urbaine.

Les travaux présentés au Chapitre 6 permettent d'évaluer les besoins annuels de chaud et de froid d'un quartier à partir de sa transformation en quartier générique équivalent, puis par l'application de

métamodèles du moteur de STD EnergyPlus. Cependant, ces besoins sont calculés de manière très simplifiée (nombreuses hypothèses simplificatrices dans les simulations EnergyPlus sur lesquelles les métamodèles sont développés), en accord avec le stade d'avancement de la conception des bâtiments. Les valeurs absolues ainsi obtenues ne sont donc pas exploitables pour en déduire les futures consommations d'énergie des bâtiments qui alimenteraient leurs inventaires de cycle de vie. Ces besoins doivent être considérés comme des indicateurs du potentiel de chauffage passif et du potentiel de confort d'été passif d'un projet aménagement. Notre stratégie d'intégration de ces développements à NEST consiste donc à proposer un module additionnel permettant la comparaison de projets ou de scénarios basée sur l'analyse de la forme urbaine, et sur les critères de chauffage passif et de confort d'été passif.

Sur le plan calculatoire, les données géométriques nécessaires au calcul d'un modèle de quartier équivalent pourront être extraites à partir du modèle 3D. Les paramètres de ce quartier équivalent seront ensuite utilisés pour évaluer par le biais de métamodèles les besoins de chaud et de froid du quartier étudié.

Sur le plan technique, les métamodèles tels que nous les avons construits et utilisés au chapitre 6 sont des objets de type « NumericalMathFunction » issus de la librairie Python Openturn et stockés sous forme de fichier « .pkl ». Ce format de fichier est facilement importable et utilisable dans un environnement Python. Il est également possible d'écrire les métamodèles (polynômes) dans un fichier texte (ASCII) qui est lisible et interprétable par tout type de langage. C'est cette option qui sera utilisée pour l'intégration dans NEST.

En pratique ce module permettra d'indiquer que le scénario 1 présente un potentiel de chauffage passif (respectivement confort d'été passif) X% supérieur (respectivement inférieur) au scénario 2. Si les différences entre les valeurs calculées sont inférieures aux seuils de significativité de la méthode alors les scénarios seront déclarés équivalents. Un classement de différents scénarios d'aménagement pourra ainsi être établi sur la base de l'analyse de la forme de l'opération.

Des champs informatifs seront associés à ce nouveau module de comparaison dans NEST afin d'explicitier les critères d'applicabilité de la méthode. Ces informations permettront en premier lieu d'informer les utilisateurs quant aux configurations dans lesquelles la méthode mise en œuvre fonctionne le mieux. Une vérification préalable des paramètres du quartier sera réalisée par NEST, sur la base des informations géométriques extraites du modèle 3D, dans le but de générer des avertissements lorsque ce dernier présente des caractéristiques inadaptées aux métamodèles disponibles en base de données.

Rappelons enfin qu'actuellement les métamodèles développés ne sont pas représentatifs de toutes les typologies de bâtiments et de toutes les zones climatiques françaises. A terme, l'objectif est de constituer une base de données de métamodèles, représentatifs de l'ensemble des zones climatiques françaises et pour différents types de bâtiments. La difficulté principale résidera dans la capacité à gérer la diversité des types de bâtiments, et les bâtiments à usage mixte sur une même opération d'aménagement. En parallèle il sera intéressant d'affiner les critères d'applicabilité pour permettre une comparaison optimale des scénarios.

7.2. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les travaux effectués dans le cadre de cette thèse ont visé à développer, pour les concepteurs urbains, des moyens de prise en compte de l'influence de la forme urbaine sur les potentiels énergétiques d'un projet de quartier avec perspective cycle de vie. Notre thèse était la suivante : « Il est possible et pertinent de développer un outil d'aide à la conception des opérations d'aménagement, adapté à la

phase d'établissement du plan masse et basé sur l'évaluation des projets par la méthode de l'analyse de cycle de vie enrichie par les apports de l'analyse morpho-climatique pour le traitement des potentiels énergétiques des bâtiments et du quartier ». Dans un premier temps nous avons cherché à mettre en évidence la pertinence d'un tel outil. Dans un second temps, nous avons développé des briques méthodologiques préfigurant un tel outil, et permettant de traiter une partie des thématiques énergétiques relatives au cycle de vie du quartier, à savoir l'énergie grise et l'empreinte carbone des bâtiments, ainsi que leur potentiel de chauffage passif de confort d'été passif.

Nous avons réalisé une revue critique de l'application de l'ACV à l'évaluation de l'environnement bâti à l'échelle du quartier (Chapitre 2). Cette revue critique a mis en évidence une tendance pour l'application de l'ACV à cette échelle, ainsi que sa pertinence comme outil d'aide à la décision. Il existe cependant de nombreux défis méthodologiques dont la difficulté de prise en compte du contexte local (forme urbaine) pour l'établissement des inventaires de cycle de vie des bâtiments. In fine, nous avons pu constater qu'il n'existe pas d'outil d'ACV de quartier, appropriable par les concepteurs urbains, qui permettent de travailler sur les potentiels énergétiques en lien avec la forme urbaine.

Un état de l'art sur les interactions entre forme urbaine, climat et énergie (Chapitre 3) a révélé l'influence des leviers de conception des urbanistes, au stade de l'établissement du plan masse, sur les consommations énergétiques d'un quartier en phase d'usage. Afin de mieux appréhender l'influence relative de ces leviers de conception nous avons mené une campagne de simulation thermo-radiative avec le logiciel SOLENE (Chapitre 5) sur deux cas d'étude. Relativement à l'évaluation des potentiels de chauffage passif et de confort d'été passif des bâtiments à l'échelle du quartier, cette étude a mis en évidence la nécessité de considérer l'influence de la forme urbaine sur les apports solaires, mais également sur les flux conductifs à travers les parois opaques. S'agissant des apports solaires, nous avons notamment mis en évidence la nécessaire prise en compte des inter-réflexions. S'agissant des déperditions ou apertions thermiques via les parois opaques, nous avons montré qu'il n'est pas possible d'évaluer leurs variations à partir d'évaluation approchées des sollicitations microclimatiques des bâtiments. Nous avons également vérifié que les stratégies de végétalisation et le choix des albédos sont des leviers aussi importants que la forme urbaine (géométrie) pour travailler sur les potentiels bioclimatiques d'un quartier.

Un état de l'art sur la l'influence de la forme des bâtiments sur leur énergie grise et leur empreinte carbone des bâtiments (Chapitre 4) a permis d'entrevoir que la forme d'un bâtiment est un facteur déterminant. Nous avons alors proposé un modèle simplifié pour l'évaluation de l'énergie grise et de l'empreinte carbone des bâtiments. Ce modèle permet d'alimenter les inventaires de cycle de vie des bâtiments en ce qui concerne les matériaux de construction, et ce pour les phases de construction, maintenance et fin de vie, et d'en évaluer les impacts. Il prend en compte les principaux éléments fonctionnels du bâtiment, mais ne prend pas en compte la totalité des lots de matériaux de construction et systèmes. Nous avons donc montré au Chapitre 7 comment il peut être complété par des sources de données génériques pour être intégré à l'outil NEST. Une analyse de sensibilité et une analyse de contribution menées grâce à ce modèle sur des bâtiments résidentiels collectifs en voile béton et isolés par l'intérieur, ont par ailleurs permis de proposer une analyse détaillée de l'influence de la forme des bâtiments sur l'énergie grise et l'empreinte carbone. Cette analyse a confirmé les premiers éléments extraits de la littérature, à savoir l'influence primordiale de la hauteur des bâtiments, mais a également mis en évidence l'influence non négligeable d'autres paramètres de forme, ce qui se traduit notamment par un lien très étroit entre compacité et énergie grise (et empreinte carbone).

S'agissant de l'évaluation de la phase d'usage du quartier, nous avons concentré nos efforts sur la thématique des besoins thermiques des bâtiments. Prenant acte de l'impossibilité d'évaluer

pertinence des besoins (et donc consommations) de chauffage/climatisation au stade du plan masse d'un projet d'aménagement, nous avons néanmoins voulu explorer cette thématique partant du principe, étayé par notre état de l'art, que la forme urbaine conditionne en partie ces consommations. Nous nous sommes donc attachés à proposer une approche d'évaluation des potentiels de chauffage passif et de confort d'été passif des bâtiments à l'échelle du quartier. Cette approche repose dans un premier temps sur l'analyse morphologique du quartier qui permet de le transformer en quartier générique équivalent du point de vue des besoins thermiques. Dans un second temps, les besoins du quartier générique équivalent sont évalués grâce à des métamodèles du moteur de simulation thermique dynamique EnergyPlus. Nous avons testé la validité de cette approche sur un échantillon de 45 cas d'étude, et avons pu mettre en évidence une résolution de 1,1 kWh/m².an pour les besoins de chaud utilisés comme indicateur du potentiel de chauffage passif, et une résolution de 1,6 kWh/m².an pour les besoins de froid utilisés comme indicateur du potentiel de confort d'été passif.

Les perspectives pour la suite de nos travaux sont nombreuses. Tout d'abord, pour remplir notre objectif initial de proposer un outil d'aide à la décision pour les phases amont de conception de projets d'aménagement, nos travaux devront être intégrés à l'outil NEST. Ce qui permettra de proposer un outil d'ACV quartier appropriable par les maîtrises d'œuvre urbaines, et sensible à leurs leviers de conception. Nos travaux viennent enrichir les évaluations relatives aux bâtiments. Les évaluations des autres champs du système quartier, à savoir les espaces extérieurs, les réseaux et la mobilité sont déjà sensibles à la forme urbaine dans NEST. L'intégration du modèle d'évaluation de l'énergie grise et de l'empreinte carbone des bâtiments pourra être totale, et ce modèle pourra remplacer l'approche existante dans NEST. S'agissant de l'approche d'évaluation des potentiels de chauffage et de confort d'été passif, l'intégration ne contribuera pas directement au calcul des indicateurs énergie primaire totale et contribution au changement climatique actuellement proposés par NEST. Cela nécessiterait d'extrapoler des consommations de chauffage et de climatisation à partir de nos développements, ce qui ne nous paraît pas pertinent. Nous envisageons plutôt le développement d'un module complémentaire proposant une information nouvelle sur les potentiels bioclimatiques de scénarios d'aménagement et ce dans une logique de score relatif.

Les développements réalisés dans cette thèse sont directement applicables à l'évaluation de quartiers composés de bâtiments résidentiels collectifs en voile béton et isolation thermique par l'intérieur, et dans le contexte français. Ces travaux devront donc être répliqués pour couvrir davantage de types de bâtiments, systèmes constructifs, et zones géographiques (pour ce qui est de l'évaluation des potentiels de chauffage et de confort d'été passif). Des développements complémentaires devront concerner les bâtiments et quartiers mixtes.

Au-delà de l'opérationnalisation de nos développements au travers de leur intégration à l'outil NEST. Il serait intéressant d'appliquer ces développements à de nouveaux cas d'étude, de manière notamment à consolider les critères d'applicabilité et la résolution du modèle d'évaluation des potentiels bioclimatiques. Nos développements ont principalement été envisagés, en accord avec la vocation initiale de l'outil NEST, c'est-à-dire l'évaluation de projets d'aménagement. Cependant, ils apparaissent également pertinents pour servir de base à des études plus théoriques visant à supporter des stratégies urbaines à plus grande échelle, telle que l'étude des impacts de la densification par exemple. Etant donnée d'une part la possibilité de répliquer nos approches dans n'importe quel contexte géographique, et d'autre part la pertinence pour l'évaluation de quartiers de grande taille, deux domaines d'application nous apparaissent particulièrement prometteurs ; l'étude de tissus urbains existants dans le cadre du questionnement sur les stratégies de rénovation urbaine, et l'étude de projets de développement urbain à grande échelle tels qu'ils existent notamment dans les pays émergents. Enfin il apparaît prioritaire de tester ces développements en situation opérationnelle, avec

des maîtrises d'œuvre urbaine, pour en valider l'applicabilité et le potentiel d'interaction avec les processus habituels de prise de décision.

REFERENCES

- Adolphe, L., 2001. Modelling the link between built environment and urban climate : towards simplified indicators of the city environment. , pp.679–684.
- Adolphe, L., 2009. Morphometric Integrators of a Sustainable City. , (June), pp.22–24.
- AFNOR, 2006. *Iso 14040:2006 Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*,
- AFNOR, 2008. *Norme NF EN ISO 6946, Composants et parois des bâtiments - Résistance thermique et coefficient de transmission thermique - Méthode de calcul*,
- AFNOR, 2004. *Norme NF P01-010, Qualité environnementale des produits de construction* AFNOR Edit., La Plaine Saint-Denis. Available at:
<http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCEQFjAA&url=http://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p01-010/qualite-environnementale-des-produits-de-construction-declaration-environnementale-et-sanitaire-des-produits-de-construction/art>.
- 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), pp.94–108.
- Allen, R.G. et al., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines fo computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper 56*. , p.300.
- Andersen, M. & Nault, E., 2013. Influence de la forme urbaine sur le potentiel solaire. In E. Rey, ed. *Green Density*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, pp. 51–72.
- Anderson, J.E., Wulfhorst, G. & Lang, W., 2015. Energy analysis of the built environment—A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, pp.149–158. Available at:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403211401079X> [Accessed January 6, 2015].
- Armand Decker, S., 2015. *Développement d'une méthode d'optimisation multiobjectif pour la construction bois : prise en compte du confort thermique des usagers, de l'impact environnemental et de la sécurité de l'ouvrage*. Université de Bordeaux.
- Athamena, K., 2012. *Modélisation et simulation des microclimats urbains : Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des Eco-Quartiers*.
- Aye, L. et al., 1999. Optimising embodied energy in commercial office development. In *RICS Foundation*. pp. 217–223.
- Azevedo, L.B. et al., 2013. Assessing the importance of spatial variability versus model choices in Life Cycle Impact Assessment: the case of freshwater eutrophication in Europe. *Environmental science & technology*, 47(23), pp.13565–70.
- Baker, N. & Steemers, K., 2000. *Energy and environment in architecture: A technical design guide*,
- Basbagill, J. et al., 2013. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Building and Environment*, 60, pp.81–92. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>.
- Baynes, T.M. & Wiedmann, T., 2012. General approaches for assessing urban environmental sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(4), pp.458–464. Available at:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877343512001091> [Accessed December 16, 2014].

- Berghauser Pont, M. & Haupt, P., 2007. The relation between urban form and density. In *International Seminar on Urban Form*. pp. 62–66.
- Berghauser Pont, M. & Haupt, P., 2005. The Spacemate : Density and the Typomorphology of the Urban Fabric. , pp.55–68.
- Bernabé, A. et al., 2015. Radiative properties of the urban fabric derived from surface form analysis: A simplified solar balance model. *Solar Energy*, 122, pp.156–168.
- Bouyer, J., 2009. Modélisation et simulation des microclimats urbains Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments.
- Bouyer, J., Inard, C. & Musy, M., 2011. Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings*, 43(7), pp.1549–1559. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811000545> [Accessed March 4, 2014].
- Bouyer, J., Musy, M. & Inard, C., 2010. Urban planning as a solution to save energy in buildings. In *10th Urban Environment Symposium*. Gothenburg, Sweden.
- Bruse, M., 1999. *The influence of local environmental design on microclimate*.
- Bueno, B. et al., 2013. The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(4), pp.269–281. Available at: <https://www.scopus-com.docelec.u-bordeaux.fr/record/display.uri?view=basic&eid=2-s2.0-84875017618&origin=resultslist>.
- Buyle, M., Braet, J. & Audenaert, A., 2012. LCA in the construction industry : a review. *International Journal of Energy and Environment*, 6(4), pp.397–405. Available at: <http://hdl.handle.net/10067/1009540151162165141>.
- Cabeza, L.F. et al., 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, pp.394–416. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113005777> [Accessed February 20, 2014].
- Cerqual, 2012. *Les tendances constructives dans les opérations BBC Effinergie*,
- Cerqual, 2014. *Les tendances constructives des opérations en démarche de certification*,
- Charlot-Valdieu, C. & Outrequin, P., 2012. *Concevoir et évaluer un projet d'éco-quartier: avec le référentiel INDI*. Editions d., Paris.
- Chen, H. et al., 2009. Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. *Building and Environment*, 44(11), pp.2290–2299. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.03.012>.
- Chen, X., Yang, H. & Sun, K., 2016. Developing a meta-model for sensitivity analyses and prediction of building performance for passively designed high-rise residential buildings. *Applied Energy*. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.180>.
- Cherqui, F., 2005. *Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier, Méthode ADEQUA. PhD dissertation*. Université de La Rochelle, La Rochelle. Available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00012089/document>.
- Chlela, F. et al., 2009. A new methodology for the design of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 41(9), pp.982–990.
- CIMbéton, 2009. *Recherche de paramètres influençant la qualité environnementale des bâtiments à basse consommation énergétique - Comparaison des impacts environnementaux*,

- Colombert, M. et al., 2011. Analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier: un outil d'aide à la décision? Le cas de la ZAC Claude Bernard à Paris (France). *Environnement Urbain / Urban Environment*, 5, pp.1–21.
- Crawley, D.B. et al., 2001. EnergyPlus : Creating a New-Generation Building Energy Simulation Program EnergyPlus : creating a new-generation building energy simulation program. , 33, pp.319–331.
- Davila, C.C. & Reinhart, C., 2013. Urban energy lifecycle : An analytical framework to evaluate the embodied energy use of urban developments. In *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28*. pp. 1280–1287.
- Dorer, V. et al., 2013. Modelling the urban microclimate and its impact on the energy demand of buildings and building clusters. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, pp.3483–3489. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84886656074&partnerID=tZOtx3y1>.
- Duforestel, T. et al., 2012. *Projet HABISOL-VALERIE. Valorisation par l'enveloppe du bâtiment des ressources énergétiques immédiatement exploitables. Rapport final*,
- Durand-Estebe, B., Lopez, J. & Mora, L., 2016. Intégration et tests de méthodes d'analyse de sensibilité et de propagation d'incertitudes appliquées à la simulation thermique dynamique de bâtiment. In *IBPSA France 2016*. p. 8.
- EC JRC-IES, 2010a. ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment.
- EC JRC-IES, 2010b. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook - general guide for Life Cycle Assessment - detailed guidance. Available at: [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:International+Reference+Life+Cycle+Data+System+\(ILCD\)+Handbook+-+General+guide+for+Life+Cycle+Assessment+-+Detailed+guidance#0](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:International+Reference+Life+Cycle+Data+System+(ILCD)+Handbook+-+General+guide+for+Life+Cycle+Assessment+-+Detailed+guidance#0) [Accessed February 6, 2015].
- EIFER & LSE Cities, 2011. Cities and Energy: Urban morphology and Heat Energy Demand. , pp.227–249. Available at: <https://lsecities.net/publications/reports/cities-and-energy-urban-morphology-and-heat-energy-demand/>.
- Eisenhower, B. et al., 2012. A methodology for meta-model based optimization in building energy models. *Energy and Buildings*, 47, pp.292–301.
- European Commission, 2011. *Roadmap to a Resource Efficient Europe*,
- Flourentzou, F., 2003. Hermione Tri, une méthode d'agrégation multicritère qualitative à base de règles.
- Foraboschi, P., Mercanzin, M. & Trabucco, D., 2014. Sustainable structural design of tall buildings based on embodied energy. *Energy and Buildings*, 68(PARTA), pp.254–269. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.003>.
- Forsberg, A., 2003. *Environmental Assessment of the Urban Environment – Development and First Application of the Environmental Load Profile for Hammarby Sjöstad*. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Fouquier, A. et al., 2013. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, pp.272–288.
- Frischknecht, R., 1998. *Life cycle inventory analysis for decision-making*. Swiss federal institute of

technology Zurich.

- Frischknecht, R. et al., 2004. "Overview and Methodology", *ecoinvent report No. 1*, Dübendorf, Suisse.
- Gardezi, S.S.S. et al., 2016. A multivariable regression tool for embodied carbon footprint prediction in housing habitat. *Habitat International*, 53, pp.292–300. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0197397515002441>.
- Gastellu-Etchegorry, J.P., Zagolski, F. & Romier, J., 1996. A simple anisotropic reflectance model for homogeneous multilayer canopies. *Remote Sensing of Environment*, 57(1), pp.22–38.
- Van Gelder, L. et al., 2014. Comparative study of metamodelling techniques in building energy simulation: Guidelines for practitioners. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 49, pp.245–257. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2014.10.004>.
- Goedkoop, M. et al., 2009. *ReCiPe 2008, a Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level*,
- Goedkoop, M. & Spriensma, R., 2000. *The Eco-indicator99: a damage oriented method for life cycle impact assessment: methodology report*, Amersfoort. Available at: citeulike-article-id:11785193%5Cn<http://irs.ub.rug.nl/dbi/4581696db734f>.
- Gracik, S. et al., 2015. Effect of urban neighborhoods on the performance of building cooling systems. *Building and Environment*, 90, pp.15–29. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315000943> [Accessed May 1, 2015].
- Gros, A., 2013. *Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier*.
- Gros, A., Bozonnet, E. & Inard, C., 2014. Cool materials impact at district scale - Coupling building energy and microclimate models. *Sustainable Cities and Society*, 13, pp.254–266. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2014.02.002>.
- Guinee, J. et al., 2001. *Life cycle assessment An operational guide to the ISO standards*, Leiden.
- Guinée, J.B. et al., 2011. Life Cycle Assessment : Past , Present, and Future. *Environmental Science and Tcechnology*, 45(1), pp.90–96.
- Guinée, J.B., Udo de Haes, H.A. & Huppes, G., 1993. Quantitative life cycle assessment of products. *Journal of Cleaner Production*, 1(1), pp.3–13. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0959652693900279> [Accessed February 19, 2015].
- Hénon, A. et al., 2011. High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign. *Building and Environment*, 46(9), pp.1747–1764. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.02.001>.
- Herfray, G., 2011. *Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers*.
- Herfray, G., Vorger, E. & Peuportier, B., 2011. Life cycle assessment applied to urban settlements and urban morphology studies. In *CISBAT 11: Cleantech sustainable buildings, From Nano to urban scale, Lausanne, 2011*.
- Hester, J., Gregory, J. & Kirchain, R., 2016. Sequential Early-Design Guidance for Residential Single-Family Buildings Using a Probabilistic Metamodel of Energy Consumption. *accepted in Energy and Buildings*, 134, pp.202–211. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.047>.
- Huang, Y., 2010. *Methodology of Climatic Design of Urban District for Buildings Energy Efficiency*.

- Ecole Centrale de Nantes et Université de Science et Technologie de Huazhong (Chine).
- IEA, 2011. *World Energy Outlook 2011*, IEA Publications, 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15. Available at: <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2011/>.
- INIES, 2016. INIES. Available at: <http://www.inies.fr/accueil/>.
- Iooss, B. & Lemaître, P., 2015. A review on global sensitivity analysis methods. In *Uncertainty management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications*. p. 23. Available at: <http://arxiv.org/abs/1404.2405>.
- IPCC, 2014. *Synthesis of the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*,
- ISO, 2006a. 14044: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles & Framework.
- ISO, 2006b. 14044: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements & Guidelines.
- IZUBA-Energies & Mines-Paristech, NovaEQUER. Available at: <http://www.izuba.fr/logiciel/novaequer>.
- Jin, R., Chen, W. & Simpson, T.W., 2001. Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 23(1), pp.1–13.
- Johansson, E., 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41(10), pp.1326–1338.
- Jolliet, O. et al., 2005. *Analyse de cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan*, Les Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Jolliet, O. et al., 2003. *Final report of the LCIA Definition study*, Available at: [https://sph.umich.edu/riskcenter/jolliet/Jolliet 2003 LCIA_defStudy.pdf](https://sph.umich.edu/riskcenter/jolliet/Jolliet%2003%20LCIA_defStudy.pdf).
- Karimpour, M. et al., 2014. Minimising the life cycle energy of buildings: Review and analysis. *Building and Environment*, 73, pp.106–114. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313003399> [Accessed January 23, 2015].
- Kim, Y.J., 2016. Comparative study of surrogate models for uncertainty quantification of building energy model: Gaussian Process Emulator vs. Polynomial Chaos Expansion. *Energy and Buildings*, 133, pp.46–58. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.032>.
- Koellner, T. et al., 2013. UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(6), pp.1188–1202.
- Kounina, A. et al., 2012. Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), pp.707–721.
- Lebert, A. et al., 2013. Capitalisation des résultats de l' expérimentation HQE Performance . Analyse statistique Action 22. , pp.1–235.
- Leconte, F. et al., 2015. Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements. *Building and Environment*, 83, pp.39–49.
- LEMA-ULg & AEC-UCL, 2014. SOLEN. Available at: <http://solen-energie.be/>.
- Lenzen, M., 1999. Total requirements of energy and greenhouse gases for Australian transport.

- Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 4(4), pp.265–290. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920999000097> [Accessed February 7, 2015].
- Li, D., Liu, G. & Liao, S., 2015. Solar potential in urban residential buildings. *Solar Energy*, 111, pp.225–235. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.045>.
- Li, D. & Wang, R., 2009. Hybrid Energy-LCA (HEML) based metabolic evaluation of urban residential areas: The case of Beijing, China. *Ecological Complexity*, 6(4), pp.484–493. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1476945X09000877> [Accessed December 9, 2014].
- Lindberg, F., Holmer, B. & Thorsson, S., 2008. SOLWEIG 1.0--modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, 52(7), pp.697–713.
- Loiseau, E., 2014. *Elaboration d'une démarche d'évaluation environnementale d'un territoire basée sur le cadre méthodologique de l'Analyse du Cycle de vie (ACV) Application au territoire du bassin de Thau.*
- Loiseau, E. et al., 2012. Environmental assessment of a territory: An overview of existing tools and methods. *Journal of Environmental Management*, 112(15 December 2012), pp.213–225.
- Lotteau, M. et al., 2015. Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. *Building and Environment*, 93, pp.165–178. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132315300445>.
- Magnier, L. & Haghghat, F., 2010. Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Building and Environment*, 45(3), pp.739–746. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.016>.
- Malys, L., 2012. *Evaluation de l'impact de dispositifs végétaux architecturaux sur la consommation énergétique des bâtiments.*
- Malys, L., Musy, M. & Inard, C., 2015. Microclimate and building energy consumption: study of different coupling methods. *Advances in Building Energy Research*, 9(2), pp.151–174. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17512549.2015.1043643>.
- Martin, L. & March, L., 1972. *Urban space and structures* University.,
- Martins, T., Adolphe, L. & Bonhomme, M., 2013. Building Energy Demand Based on Urban Morphology Case Study in Maceió , Brazil. In *PLEA 2013: Sustainable Architecture for a Renewable Future*. pp. 1–6. Available at: <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1169253/1169253.pdf>.
- Martins A.L., T., Adolphe, L. & Bastos E.G., L., 2014. From solar constraints to urban design opportunities: Optimization of built form typologies in a Brazilian tropical city. *Energy and Buildings*, 76, pp.43–56. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814001704> [Accessed March 26, 2014].
- McAdams, W.H., 1954. *Heat Transmission. 3rd*, New York.
- McNeel, 2013a. Grasshopper: algorithmic modelling for Rhino. Available at: <http://www.grasshopper3d.com/>.
- McNeel, 2013b. Rhinoceros 5. Available at: <http://www.rhino3d.com/>.
- Meadows, D.H. et al., 1972. *The Limits to Growth : A Report to The Club of Rome.* , pp.1–9.

- Melo, A.P. et al., 2016. Development and analysis of a metamodel to represent the thermal behavior of naturally ventilated and artificially air-conditioned residential buildings. *Energy and Buildings*, 112, pp.209–221. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.021>.
- Merheb, R., 2013. Fiabilité des outils de prévision du comportement des systèmes thermiques complexes. Available at: <http://www.theses.fr/2013BOR14959>.
- Metz, B. et al., 2007. *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Miguet, F., 2000. *Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans un projet urbain, thèse de doctorat*.
- Miller, C. et al., 2015. Long wave radiation exchange for urban scale modelling within a co-simulation environment. *Proceedings of CISBAT 2015*, pp.871–876.
- Morris, M.D., 1991. Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, 33(2), pp.161–174.
- Musy, M. et al., 2012. Modélisation des interactions ville-climat-énergie. In *Modélisation urbaine: de la représentation au projet*. Commissariat Général au Développement Durable, pp. 18–35.
- Nadeau, J.P. & Puiggali, J.R., 1995. *Séchage: des processus physiques aux procédés industriels* Lavoisier,.,
- Nault, E. et al., 2017. Predictive models for assessing the passive solar and daylight potential of neighborhood designs: A comparative proof-of-concept study. *Building and Environment*. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132317300197>.
- Nault, E. et al., 2015. Review and critical analysis of early-design phase evaluation metrics for the solar potential of neighborhood designs. *Building and Environment*, 92, pp.679–691. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315002243> [Accessed May 30, 2015].
- Nguyen, A.-T., Reiter, S. & Rigo, P., 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113, pp.1043–1058. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913007058>.
- Nichols, B.G. & Kockelman, K.M., 2014. Life-cycle energy implications of different residential settings: Recognizing buildings, travel, and public infrastructure. *Energy Policy*, 68, pp.232–242. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513013268> [Accessed December 16, 2014].
- Nikolopoulou, M., 2004. *Projet RUROS : Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain : une approche bioclimatique*,
- Norman, J. et al., 2006. Comparing High and Low Residential Density : Life-Cycle Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Urban Planning and Development*, (March), pp.10–21.
- Nouvel, R. et al., 2015. SIMSTADT , a New Workflow-driven Urban Energy Simulation Platform for CityGML City Models. In *CISBAT 2015 - Lausanne, Switzerland*. Lausanne, Switzerland, pp. 889–894.
- Oke, T.R., 1987. *Boundary Layer Climates*, Psychology Press.
- Oke, T.R., 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : Comparison of scale model and field observations. *International Journal of Climatology*, 1(3), pp.237–254.

- Oke, T.R., 2004. *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*,
- Oliver-Solà, J. et al., 2011. The GWP-Chart: An environmental tool for guiding urban planning processes. Application to concrete sidewalks. *Cities*, 28(3), pp.245–250. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264275111000163> [Accessed December 3, 2014].
- Ortiz, O., Castells, F. & Sonnemann, G., 2009. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), pp.28–39. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061807003005> [Accessed January 23, 2014].
- Palme, M. et al., 2017. From urban climate to energy consumption. Enhancing building performance simulation by including the urban heat island effect. *Energy and Buildings*, 145, pp.107–120. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.069>.
- Peuportier, B., 2013. *Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures*,
- Peuportier, B., Kohler, N. & Boonstra, C., 1997. European project REGENER life cycle analysis of buildings. In *Buildings and the environment. International conference*. pp. 33–40.
- Peuportier, B., Popovici, E. & Trocmé, M., 2006. *Analyse de cycle de vie à l' échelle du quartier - Bilan et perspectives du projet ADEQUA*,
- Peuportier, B. & Roux, C., 2013. Eco-design of urban settlements using LCA. In *LCA [avniR] Conference 2013, Proceedings of the 3rd international conference on life cycle approaches*. pp. 1–6.
- Pomponi, F. & Moncaster, A., 2016. Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – What does the evidence say? *Journal of Environmental Management*, 181(August), pp.687–700. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479716305746>.
- Poncin, E. & Flourentzou, F., 2003. Méthode d'optimisation en phase de matérialisation : Hermione Projet.
- Popovici, E., 2006. *Contribution à l'analyse de cycle de vie des quartiers. PhD dissertation*. Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, Paris.
- Rabouille, M., 2014. Recherche de la performance en simulation thermique dynamique : Application à la réhabilitation des bâtiments. , p.181. Available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01142344/document>.
- Ramesh, S. & Lam, K.P., 2015. Urban energy information modeling – a framework for coupling macro-micro factors affecting building energy consumption. *BS 2015 - 14th Int. IBPSA Conference*, pp.601–608.
- Ratti, C., Baker, N. & Steemers, K., 2005. Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 37(7), pp.762–776.
- Ratti, C., Raydan, D. & Steemers, K., 2003. Building form and environmental performance: Archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1), pp.49–59.
- Reinhart, C.F. et al., 2013. Umi - an Urban Simulation Environment for Building Energy Use , Daylighting and Walkability. In *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*. pp. 476–483.
- Reinhart, C.F. & Cerezo Davila, C., 2016. Urban building energy modeling - A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, pp.196–202. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>.

- Riera Perez, M.G., 2013. SméO , a sustainability assessment tool targeting the 2000 Watts society. , pp.1–3.
- Riera Pérez, M.G. & Rey, E., 2013. A multi-criteria approach to compare urban renewal scenarios for an existing neighborhood. Case study in Lausanne (Switzerland). *Building and Environment*, 65, pp.58–70. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132313000978> [Accessed December 1, 2014].
- Robinson, D. et al., 2009. Citysim: Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning. *Building simulation 2009*, pp.1083–1090.
- Robinson, D. & Stone, A., 2005. A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(4), pp.271–284. Available at: <http://bse.sagepub.com/cgi/doi/10.1191/0143624405bt133oa>.
- Robitu, M., 2005. *Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain -influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs*.
- Rodríguez-Álvarez, J., 2016. Urban Energy Index for Buildings (UEIB): A new method to evaluate the effect of urban form on buildings' energy demand. *Landscape and Urban Planning*, 148, pp.170–187. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169204616000025>.
- Roudsari, M.S., 2013. Honeybee. Available at: <http://www.grasshopper3d.com/group/ladybug>.
- Salat, S., 2011. *Les villes et les formes* CSTB, ed.,
- SNPBE, 2011. BETie: Béton et Impacts Environnementaux. Available at: <http://ns381308.ovh.net/ecobilan/login.html>.
- Sobol, I.M., 1993. Sensitivity estimates for non linear mathematical models. *Mathematical Modelling and Computational Experiments*, 1(4), pp.407–414.
- Srebric, J., Heidarinejad, M. & Liu, J., 2015. Building neighborhood emerging properties and their impacts on multi-scale modeling of building energy and airflows. *Building and Environment*, 91, pp.246–262. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315000888> [Accessed March 24, 2015].
- Stemers, K., 1995. *Project ZED: Towards Zero Emission Urban Development. The interrelationship between energy, buildings, people and microclimate.*,
- Stephan, A., Crawford, R.H. & de Myttenaere, K., 2013. Multi-scale life cycle energy analysis of a low-density suburban neighbourhood in Melbourne, Australia. *Building and Environment*, 68, pp.35–49. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132313001819> [Accessed November 7, 2014].
- Stewart, I.D., 2011. *Redefining the Urban Heat Island*. The University of British Columbia. Available at: <https://circle.ubc.ca/handle/2429/38069>.
- Sudret, B., 2008. Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. *Reliability Engineering and System Safety*, 93(7), pp.964–979.
- Tirumalachetty, S., Kockelman, K.M. & Nichols, B.G., 2013. Forecasting greenhouse gas emissions from urban regions: microsimulation of land use and transport patterns in Austin, Texas. *Journal of Transport Geography*, 33, pp.220–229. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692313001385> [Accessed January 15, 2015].

- Treloar, G.J. et al., 2001. An analysis of the embodied energy of office buildings by height. *Facilities*, 19(5/6), pp.204–214.
- Treloar, G.J., 1997. Extracting Embodied Energy Paths from Input-Output Tables : Towards an Input-Output-based Hybrid Energy Analysis Method. *Economic Systems Research*, 9(4), pp.375–391.
- Trigaux, D., Allacker, K. & Troyer, F. De, 2014. Model for the environmental impact assessment of neighbourhoods.
- Trocme, M. & Lépinoy, O., 2011. ACV Quartier, application sur un projet de VINCI Immobilier. In *Indicateurs d'éco conception pour les quartiers durables, Chaire ParisTech Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures*.
- UN, 2014. *World Urbanization Prospects*,
- Unger, J., 2009. Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *Int. J. Environment and Pollution*, 36(1/2/3), pp.1–27.
- Vinet, J., 2000. *Contribution à la modélisation thermo-aérodynamique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. Université de Nantes.
- Waldron, D. et al., 2013. Embodied energy and operational energy: Case studies comparing different urban layouts. In *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*. pp. 1264–1271.
- Wang, B., 2015. *Les impacts de la Morphologie Urbaine sur le Vent : Performance énergétique éolienne à l'échelle du quartier*.
- Von Weizsäcker, E.U., Lovins, A.B. & Lovins, L.H., 1998. *Factor four: doubling wealth-halving resource use: the new report to the Club of Rome.*, Earthscan.
- Wiener, N., 1938. The Homogeneous Chaos. *American Journal of Mathematics*, 60(4), pp.897–936.
- World Commission on Environment and Development, 1987. *Our Common Future*.
- Xiu, D. & Karniadakis, G.E., 2002. The Wiener-Askey Polynomial Chaos for Stochastic Differential Equations. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 24(2), pp.619–644.
- Yang, X. et al., 2012. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. , 54, pp.243–251.
- Yepez-Salmon, G., 2011. *Construction d'un outil d'évaluation environnementale des écoquartiers : vers une méthode systémique de mise en œuvre de la ville durable*.
- Yi, C.Y. & Peng, C., 2014. Microclimate change outdoor and indoor coupled simulation for passive building adaptation design. *Procedia Computer Science*, 32(0), pp.691–698. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.478>.
- Zhao, H.X. & Magoulès, F., 2012. A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), pp.3586–3592. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049>.

ANNEXES

Annexe 1. Sources des données du système de premier-plan

Reference	Materials quantities	Buildings' energy uses - heating	Buildings' energy uses - other	Transport requirements	Water uses
Stephan et al., 2013	The neighborhood is modeled with two types of typical houses of different sizes (according to the current market trend) whose characteristics are typical to comply with the requirements of the 6-star Australian standard.	Building energy simulation based on a static heat transfer model	Average regional data	Yearly travel distances are sourced from regional data	NA
Nichols et al., 2014	GIS measurements and Google Earth and StreetView imagery are used to determine neighborhoods features like roadway and sidewalk asphalt and concrete volumes, water and wastewater pipes, street lights, and total square footage of residential space by home type (i.e. low-rise apartment, single family home, high-rise condominium).	Daily energy use in U.S. residential and commercial buildings, including electricity and natural gas consumption, are sourced from (Tirumalachetty, Kockelman, & Nichols, 2013) statistical model that controls for a number of climatic, demographic, and built environment explanatory variables.		Relies on household demographics and physical characteristics to estimate the number and types of vehicles owned by each household, the number of vehicle miles traveled (VMT), and owned-vehicle fuel economies, to predict each household's annual fuel use in driving, along with the annual number of transit trips and (average) transit trip lengths.	Aggregate estimates for water use in residential buildings (statistics from Austin) and in commercial buildings (statistics from Florida)
Norman, et al., 2006	Building material costs for the high-density case study condominium building are directly provided by industry project contacts, while material cost breakdowns for the low-density case dwellings are estimated based on a typical single-detached dwelling recently analyzed by researchers at the University of Toronto (Zachariah 2003). Utility and road infrastructure requirements are determined from as-built municipal drawings.	Operational requirements for dwellings are estimated using nationally averaged public datasets.		operational requirements for public and private transportation are sourced from location-specific data for the Greater Toronto Area.	NA
Riera-Perez et al., 2013	Material quantities for buildings are sourced from the neighborhood masterplan associated to energy efficiency improvement scenarios for buildings to be renovated, and compliance to the standard "Minergie-P" for new buildings.	The thermal energy demand is calculated following the SIA (Swiss society of Architects and engineers) norm 380/1: "Thermal energy in buildings", a normative energy demand which adapts to the different surface uses: residential, commercial, etc. This normative energy demand is then reduced depending on the energy standard targeted.	For electricity uses, the standard value defined by the SIA standard 380/1 was chosen: 100 MJ/m ² y.	The applied method is based on the technical report SIA 2039 "Mobility - Energy Consumption of Buildings according to their Location". The method weights the Swiss average energy consumption for mobility by several correction factors related to the context and facilities. "The correction factors are obtained from a statistical analysis of the Swiss federal microcensus of 2005 and vary depending on the surface uses.	NR
Davila and Reinhart, 2013	Material quantities for buildings are extracted from the neighborhood masterplan	Building energy simulation based on dynamic thermal simulation	Values for equipment, lighting and hot water energy intensity were obtained from average values for the state of Massachusetts.	NR	NR
Cherqui, 2005	Material quantities are sourced from the neighborhood masterplan and the choice of building materials is derived from the targeted energy efficiency.	Building energy simulation based on dynamic thermal simulation	NA	NR	NA
Li and Wang, 2009	The data of building materials was calculated from the local planning report and previous literature.	A survey was carried out to collect the necessary life style information: i.e. own rate and use intensity of air conditionings, water heaters, private cars, etc.			NA
Trigaux et al., 2014	Building materials quantities are determined from the neighborhood model. Standard building elements are selected from the database of a former research project (MMG project)	The heating energy demand is estimated considering an average value of 1200 equivalent heating degree days in the Belgian context	NR	NR	NR
Forsberg, 2003	NA	Heating and electricity for building services data are collected from contractors and real-estate owners		Mobility data are sourced from general statistics	Water consumption in building are collected from contractors and real-estate owners
Colombert et al., 2011	Materials quantities are sourced from the neighborhood project masterplan and buildings plans.	Building energy simulation based on dynamic thermal simulation	NA	NR	NA
Herrfay et al., 2011	Material quantities for buildings are sourced from the neighborhoods' masterplans and actual typical materials and equipments choices for these existing neighborhoods.	Building energy simulation based on dynamic thermal simulation	NA	NR	NA
Herrfay, 2011 (+ Peuportier and Roux, 2013)	Material quantities are sourced from the neighborhood masterplan and the choice of building materials is derived from the targeted energy efficiency.	Building energy simulation based on dynamic thermal simulation	NA	NR	NA
Peuportier et al., 2006	Material quantities are sourced from the neighborhood masterplan and the choice of building materials is derived from the targeted energy efficiency.	Building energy simulation based on dynamic thermal simulation	NA	NR	NA
Trocme and Lespinoy, 2011	Material quantities are sourced from the neighborhood masterplan and the choice of building materials is derived from the targeted energy efficiency.	Building energy simulation based on dynamic thermal simulation	NA	NR	NA

Annexe 2. Sources de données du système d'arrière-plan

Reference	Materials LCI	Energy vectors (Electricity, Natural Gas, Gasoline, etc.)	Transport
Stephan et al., 2013	An IO-based hybrid analysis technique developed by (Treloar, 1997) is used for the embodied energy assessment. The related energy coefficient for Australia is used in this paper.	Conversion factors to GHG emissions for the building operational energy demands, direct transport energy demands and associated energy sources (i.e. electricity, natural gas and gasoline) come from the Department of Climate Change and Energy Efficiency (Australia).	Energy and GHG intensities of the transport modes are based on input-output analysis data from (Lenzen, 1999).
Nichols et al., 2014	Embodied energy is estimated for buildings and infrastructure materials based on a meta-analysis of detailed life-cycle analyses. Rather than directly perform an IO analysis or process-based LCA, this work relies on a rather large body of existing work that estimates embodied energy of different building types (in terms of energy per floor space). This analysis assumes an average rate of embodied energy per square foot, by building type and various materials (energy per unit of volume). The sources of background data are not available in the article.		NA
Norman, et al., 2006	An economic input-output life-cycle assessment (EIO-LCA) model is applied to estimate the energy use and GHG emissions associated with the manufacture of construction materials for infrastructure. This study employs the 1997 (most recent year available) EIO-LCA model for the United States.	NA	Total GHG emissions for automotive transportation were estimated using CO2 emissions data from gasoline consumption in the Greater Toronto Area from a recent study.
Riera-Perez et al., 2013	The method applied to calculate embodied energy is based on the technical report SIA (Swiss society of Architects and Engineers) 2032 "The buildings' embedded energy", which calculates the energy needed for all components, considering their lifecycle and a time period of 60 years to write off the total embodied energy of the building.	The conversion factors from final energy to NRE, GWP are drawn from KBOB LCA data (KBOB, 2012), which is a database of LCA of construction related materials and processes, based on theecoinvent v2.2 data.	
Davila and Reinhart, 2013	ICE (Inventory of Carbon and Energy) database from the University of Bath was used as a source for Embodied Energy data.	The conversion factors employed for the translation of End Use energy into Primary energy are specific for the energy mixture of Massachusetts.	NR
Cherqui, 2005	Environmental data concerning the production of construction materials as well as the different processes that are included in the system come fromecoinvent Database		NR
Li and Wang, 2009	NA	NA	NA
Trigaux et al., 2014	Environmental data concerning the production of construction materials as well as the different processes that are included in the system come fromecoinvent Database		NR
Forsberg, 2003	Background LCI-data (electricity production, heat production, biogas production for domestic use in stoves, drinking water, waste water handling, building materials, working machines, transport of building materials and goods, domestic transport) are sourced in former LCA studies		
Colombert et al., 2011			NR
Herfray et al., 2011			NR
Herfray, 2011	Environmental data concerning the production of construction materials as well as the different processes that are included in the system come fromecoinvent Database		NR
(+ Peuportier and Roux, 2013)			NR
Peuportier et al., 2006			NR
Trocmé and Lespinois, 2011			NR

Annexe 3. Influence de la prise en compte des fondations et des niveaux de parking souterrain

Dans cette section, nous étudions les effets d'aspects spécifiques de notre modèle qui ne sont pas traités par d'autres publications; à savoir la prise en compte des fondations et l'ajout d'un niveau de parking souterrain. Cette analyse est basée sur l'étude d'un bâtiment de référence dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 53. Ce bâtiment de référence a été modélisé avec et sans niveau de stationnement souterrain, ainsi qu'avec et sans fondations pour et pour trois hauteurs (4, 9 et 14 niveaux). Dans les cas modélisés avec des fondations trois types de sols sont testés (bon, moyen et mauvais sol) correspondants à des taux de travail du sol différents : 350 000, 200 000 et 100 000 Pa.

Paramètres de forme			Paramètres d'éléments fonctionnels		
		Valeur			Valeur
dim_X (m)	s1	24	ep_béton_mur (m)	c1	0.2
dim_Y (m)	s2	12	ep_iso_mur (m)	c2	0.14
br_niveau	s3	4	ep_béton_lancher_inter (m)	c3	0.2
h_niveau (m)	s4	3	ep_béton_plancher_bas (m)	c4	0.25
h_soubassement (m)	s5	1	ep_sio_plancher_bas (m)	c5	0.16
tx_vitrage (%)	s6	0,2	ep_béton_toit (m)	c6	0.2
d_structure (m ³ /m ²)	s7	0.045	ep_iso_toit (m)	c7	0.2
d_cloisons (ml/m ²)	s8	0.22			

Tableau 53 – Caractéristiques du bâtiment de référence

Les différences relatives en termes d'EG et d'EC pour ces différents cas et en comparaison avec le cas de base (fondations prises en compte, sol moyen, pas de parking souterrain) sont présentées dans le Tableau 54.

Fondations	Parking souterrain	Energie Grise MJ/m ² plancher/an			Empreinte Carbone kgeqCO ₂ /m ² plancher/an		
		4 niveaux	9 niveaux	14 niveaux	4 niveaux	9 niveaux	14 niveaux
Pas de fondations	Pas de parking	-4%	-3%	-3%	-5%	-4%	-3%
Avec fondations – Sol mauvais	Pas de parking	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Avec fondations – Sol moyen	Pas de parking	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Avec fondations – Sol bon	Pas de parking	-1%	-1%	-1%	-1%	-1%	-1%
Avec fondations – Sol moyen	Avec parking	10%	5%	3%	12%	6%	4%

Tableau 54- Contribution des fondations and des parkings souterrains à l'énergie grise et à l'empreinte carbone

Quelle que soit la hauteur du bâtiment, le type de sol (de par son influence sur le dimensionnement des fondations) induit une différence maximale de 3% aussi bien en termes d'EG que d'EC. La non-prise en compte des fondations conduit respectivement à une sous-évaluation de 4% et 5% de l'EG et de l'EC dans le cas du bâtiment de quatre niveaux. Cet effet diminue légèrement lorsque la hauteur du bâtiment augmente. La prise en compte des fondations et du type de sols apparaissent donc nécessaires pour ce type de modèle.

Pour ce bâtiment de référence, l'ajout d'un niveau de parking souterrain (sous l'emprise du bâtiment) induit respectivement une augmentation de 10% et 12% de l'EG et de l'EC. Lorsque l'on augmente le nombre de niveaux, cet effet diminue puisque les impacts du niveau de parking répartis sur l'ensemble de la surface plancher. Pour un bâtiment de 14 niveaux l'ajout d'un niveau de parking souterrain induit respectivement une augmentation de 3% et 4% de l'EG et de l'EC.

La prise en compte des niveaux de stationnement souterrain, des fondations, ainsi que du dimensionnement des fondations en fonction de la qualité géotechnique du sol apparaissent pertinents et ce pour une large gamme de hauteurs de bâtiments (de 4 à 14 étages).

Annexe 4. Influence du choix des coefficients d'échange convectifs

Afin d'examiner l'influence sur nos simulations, des coefficients d'échange convectif et donc indirectement du vent, nous avons mené une analyse préliminaire en simulant le scénario ARM_MLA_OO_Et0 au solstice d'hiver et au solstice d'été en adoptant quatre types de paramétrage des coefficients de convection. Ces paramétrages, dénommés respectivement hc_{def} , hc_{moy} , hc_{met} et hc_{puis} sont détaillées dans le Tableau 55.

hc_{def}	Le coefficient hc est constant dans l'espace et dans le temps et fixé par défaut à 10 ($W.m^{-2}.K^{-1}$).
hc_{moy}	Le coefficient hc est constant dans l'espace et dans le temps et est calculé à partir de la moyenne journalière de la vitesse du vent issue du fichier météo, selon la formule $hc=4+4v$ (formule proposée par la norme NF EN ISO 6946 (AFNOR 2008)). $hc = 14$ ($W.m^{-2}.K^{-1}$) au solstice d'hiver $hc = 19$ ($W.m^{-2}.K^{-1}$) au solstice d'été.
hc_{met}	Le coefficient hc est constant dans l'espace mais est évalué à chaque pas de temps en fonction de la vitesse du vent issue du fichier météo (v) selon la formule : $hc=4+4v$ (formule proposée par la norme NF EN ISO 6946 (AFNOR 2008)).
hc_{puis}	Pour chaque maille de la scène urbaine et pour chaque pas de temps, hc est évalué en fonction de la vitesse du vent issue du fichier météo ($v_{ref}(t)$) et de l'altitude de la maille (z) selon une loi de puissance : $hc(z,t)=4+4*v(z,t)$ avec $v(z,t)=v_{ref}(t)*(z/z_0)^{0.3}$ et $z_0=10m$

Tableau 55 - Stratégies de paramétrage du coefficient d'échange convectif

Que ce soit au solstice d'hiver (Figure 85) ou au solstice d'été (Figure 87), on constate que les températures de surfaces moyennes des façades des toits et de la rue sont peu affectées par les différents paramétrages de hc la nuit. Par contre, la journée on observe des différences importantes qui culminent à midi.

En hiver, ces différences maximales de températures de surfaces moyennes entre les différentes simulations sont de l'ordre de :

- 5°C pour les façades et les Toits pour des températures de l'ordre de 15-20°C
- 15°C pour la rue, pour des températures de l'ordre de 15-30°C

En été, ces différences maximales de températures de surfaces moyennes entre les différentes simulations sont de l'ordre de :

- 12°C pour les façades, pour des températures de l'ordre de 35-42°C
- 25°C pour les Toits, pour des températures de l'ordre de 50-70°C
- 40°C pour la rue, pour des températures de l'ordre de 60-100°C

En été comme en hiver, on constate que pour l'ensemble des types de surfaces, les températures de surface évaluées avec hc_{def} sont plus élevées que celles évaluées avec hc_{moy} . Ceci s'explique simplement du fait que $hc_{def} < hc_{moy_HVR}$ et $hc_{def} < hc_{moy_ETE}$, ce qui entraîne des pertes convectives plus faibles dans le cas hc_{def} , et donc un moindre refroidissement des surfaces.

Egalement, les températures de surfaces évaluées avec hc_{moy} sont toujours plus élevées que celles évaluées avec hc_{met} . Ceci s'explique par le fait que le vent est plus fort en journée que la nuit, ce qui entraîne $hc_{met} > hc_{moy}$ en journée, c'est-à-dire au moment où les températures de surface sont les plus fortes. Les échanges convectifs sont donc plus importants dans le cas hc_{met} ce qui induit un refroidissement plus important des surfaces.

S'agissant des températures de surface évaluées avec hc_{puis} , en été comme en hiver, les résultats dépendent des types de surfaces, puisque hc_{puis} est calculé à partir de l'altitude des surfaces. Au niveau de la rue (altitude 0), hc_{puis} conduit aux températures de surfaces les plus fortes, les pertes convectives

étant très limitées par un coefficient de convection très faible, $hc_{\text{puis}}=4$. Au niveau des toits dont l'altitude moyenne est de 15,6m, hc_{puis} aboutit aux températures de surfaces les plus faibles, les pertes convectives étant favorisées par les fortes valeurs de hc_{puis} en altitude. Il est à noter qu'avec de telles différences de température on observerait également de la convection naturelle, et l'on pourrait envisager l'usage d'une relation de convection mixte. Pour les façades, la situation est bien sûr intermédiaire. On constate que les températures de surface évaluées avec hc_{puis} sont toujours plus faibles que celles évaluées avec hc_{def} et plus élevées que celles évaluées avec hc_{met} .

Nous avons vu qu'en hiver comme en été, le choix du coefficient d'échange convectif influe fortement sur les températures de surface. Les mécanismes en jeu sont bien sûr les échanges convectifs qui dépendent du coefficient d'échange convectif et de la température de surface, mais également les échanges GLO et la conduction dans les matériaux qui dépendent des températures de surface. Par la suite nous procédons donc à l'analyse de l'influence de hc sur les cumuls journaliers des différents flux du bilan énergétique pour les différents types de surfaces (Figure 86 et Figure 88).

Le Tableau 56 présente les moyennes et écart-types (pour les 4 paramétrages de hc) des cumuls journaliers de flux conductifs pour les différents types de surfaces. On constate qu'en moyenne sur les façades, et en moyenne sur les toits (en cumul journalier), les pertes conductives sont peu influencées par le choix de hc en hiver. Par contre en été la dispersion des résultats (gains conductifs) pour les quatre simulations est importante et on observe des variations de l'ordre de 20% autour de la moyenne. Pour ce qui est de la thermique du bâtiment ces variations sont cependant à relativiser puisque le flux solaire global incident sur les façades (qui n'est pas du tout influencé par le choix de hc) est de 2700Wh/m² (en cumul journalier). Les apports solaires transmis sont donc beaucoup plus importants (du moins en l'absence de protection solaire) que les apertions thermiques (avec nos hypothèses de 33% de surfaces vitrées et 10,5 cm de laine de verre au niveau des façades).

Cumul journalier flux conductif (Wh/m ²)	Hiver		Été	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Façades	122,4	3,4	-59,7	13,0
Toits	109,0	2,03	-66,3	12,9

Tableau 56 - Moyennes et écart-types des flux conductifs pour les quatre paramétrages du coefficient d'échange convectif

S'agissant du flux GLO total, en hiver, les quatre paramétrages de hc conduisent à des résultats relativement similaires, avec cependant quelques différences notables :

- Façades : dans les cas hc_{def} , hc_{moy} et hc_{met} , les échanges GLO avec la scène urbaine sont très faibles et constituent des pertes (10-20 Wh/m²). Dans le cas hc_{puis} les échanges GLO avec la scène urbaine sont plus importants et constituent des gains (-90 Wh/m²). En effet dans le cas hc_{puis} , les températures de surface de la rue sont plus élevées entraînant des échanges GLO plus intenses avec les façades. Les façades étant plus froides, cela se traduit par des gains GLO pour les façades. Dans tous les cas, les pertes par échanges GLO avec le ciel sont prépondérantes et entre les deux cas les plus extrêmes, hc_{def} et hc_{puis} , on constate une diminution de 20% du flux GLO total (pertes).
- Rue : par symétrie, on constate le phénomène inverse dans le cas de la rue. Les pertes GLO par échange avec la scène urbaine (les façades) sont amplifiées dans le cas hc_{puis} . Les pertes GLO vers le ciel sont également plus importantes puisque les températures de surface de la rue sont plus élevées. Au total, entre les cas hc_{def} et hc_{puis} , le flux GLO total (pertes) de la rue augmente de 12%.

En été les mêmes tendances entre hc_{def} et hc_{puis} sont amplifiées. De plus les résultats obtenus avec hc_{moy} et hc_{met} sont très similaires et assez distincts des autres.

- Façades : Par rapport à l’hiver où ils sont quasi négligeables, les échanges GLO au sein de la scène urbaine deviennent importants en été. Dans le cas $h_{c_{\text{puis}}}$, ces gains GLO sont trois fois supérieurs aux gains GLO des autres cas. En termes de flux GLO total cela se traduit par des gains GLO de l’ordre de 450 Wh/m^2 alors que l’on observe des pertes GLO de l’ordre de 500 Wh/m^2 dans les autres cas.
- Rue : de même qu’en hiver on observe dans le cas h_{puis} des pertes GLO nettes bien plus importantes dans le cas h_{puis} que dans le cas h_{def} (+40%).
- Toits : contrairement à l’hiver, où le flux GLO total au niveau des toits est peu influencé par le choix de h_c , en été on constate une diminution des pertes GLO de l’ordre de 33% entre les cas h_{def} et h_{puis} .

Les flux convectifs enfin sont largement influencés par les différents paramétrages de h_c , et ce en lien direct avec les différences de h_c et de températures de surfaces (explicitées plus haut). En hiver on constate qu’entre les cas $h_{c_{\text{def}}}$ et $h_{c_{\text{puis}}}$, sur les façades les pertes convectives diminuent de 80%, et sur les toits les gains convectifs diminuent de 54%. En été on constate qu’entre les cas $h_{c_{\text{def}}}$ et $h_{c_{\text{puis}}}$, les pertes convectives diminuent de 70% sur les façades et de 80% sur les toits.

Cette étude préliminaire sur l’influence du coefficient de convection nous a permis de quantifier l’influence du paramétrage des coefficients de convection sur les températures de surface, ainsi que sur les échanges convectifs, conductifs et sur le flux GLO total. Indirectement cela nous renseigne sur la dépendance des résultats de nos simulations aux conditions de vent.

Le coefficient h_c n’a pas d’effet sur le flux solaire global incident, et nous avons montré qu’il a relativement peu d’effet sur les flux conduits au niveau des façades et des toits (qui plus est ces flux conduits au niveau des façades sont faibles par rapport aux apports solaires transmis). Nous en déduisons que le choix de h_c a peu d’influence sur l’étude du potentiel de chauffage passif et du potentiel de confort d’été passif. Par contre nous avons également montré que le choix de h_c influe très fortement sur le flux GLO total des différentes surfaces urbaines, l’étude de la thématique du risque de contribution à l’ICU est donc certainement beaucoup plus sensible au choix de h_c .

On pourrait travailler avec des valeurs instantanées, mais alors les résultats seraient tributaires de la météo de la journée choisie. Au vu de notre choix de travailler sur des simulations sur une journée aux solstices, il ne nous paraît pas opportun pour la suite de calculer les coefficients d’échanges convectifs à partir des données de vent du fichier météo, puisque celles-ci ne sont pas représentatives de conditions moyennes. Nous conservons donc pour la suite la valeur de h_c proposée par défaut par Solene, soit $h_c=10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Si l’on considère la formule de calcul du coefficient de convection proposée par la norme NF EN ISO 6946, cela équivaut pour nos simulations à considérer une vitesse de vent constante et homogène de $1,5\text{m.s}^{-1}$.

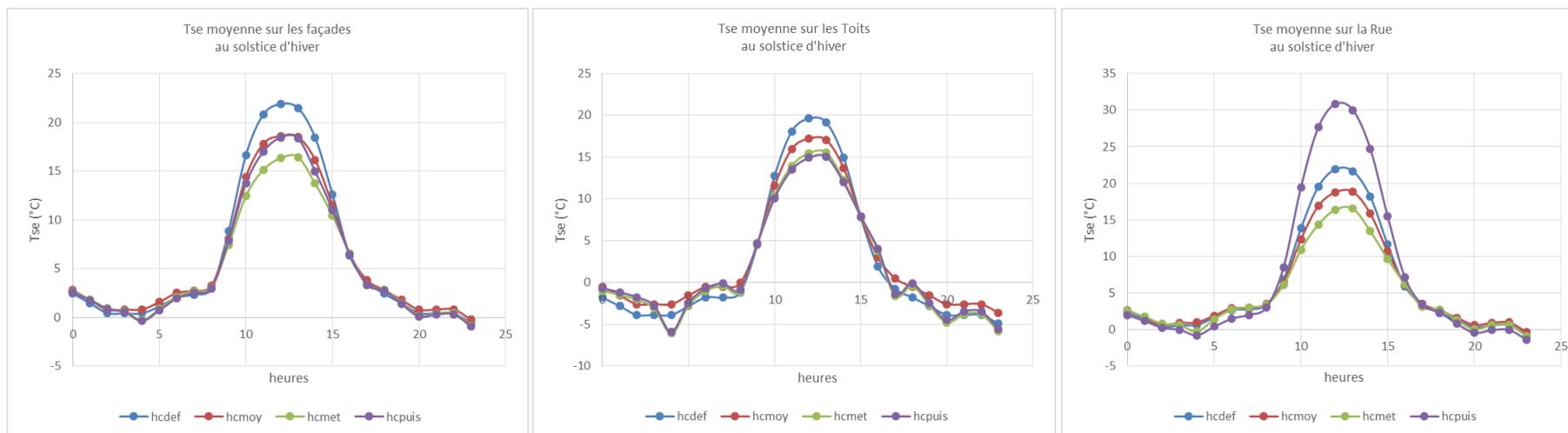


Figure 85 - Evolution horaire de des températures de surface au solstice d'hiver pour différents paramétrages du coefficient d'échange convectif

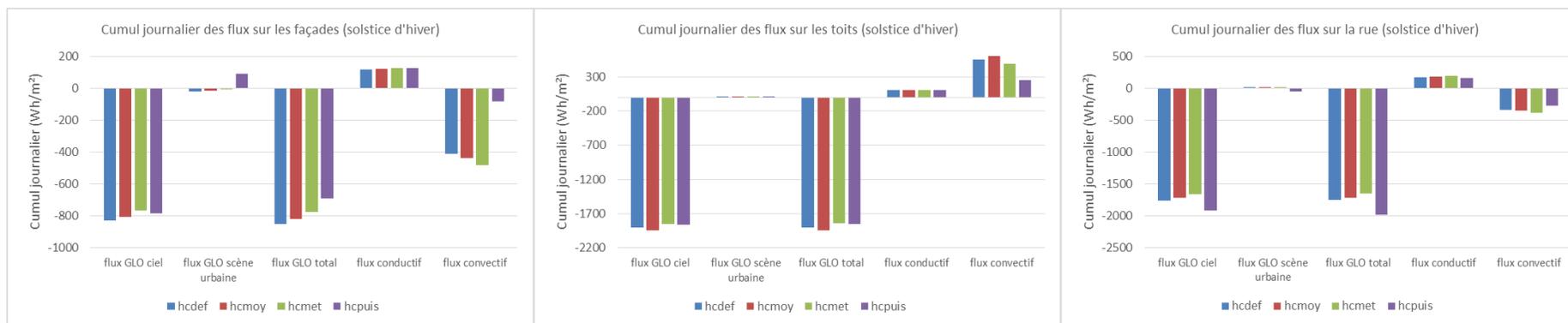


Figure 86 – Cumul journalier des flux GLO, convectif et conductif au solstice d'hiver pour différents paramétrages du coefficient d'échange convectif

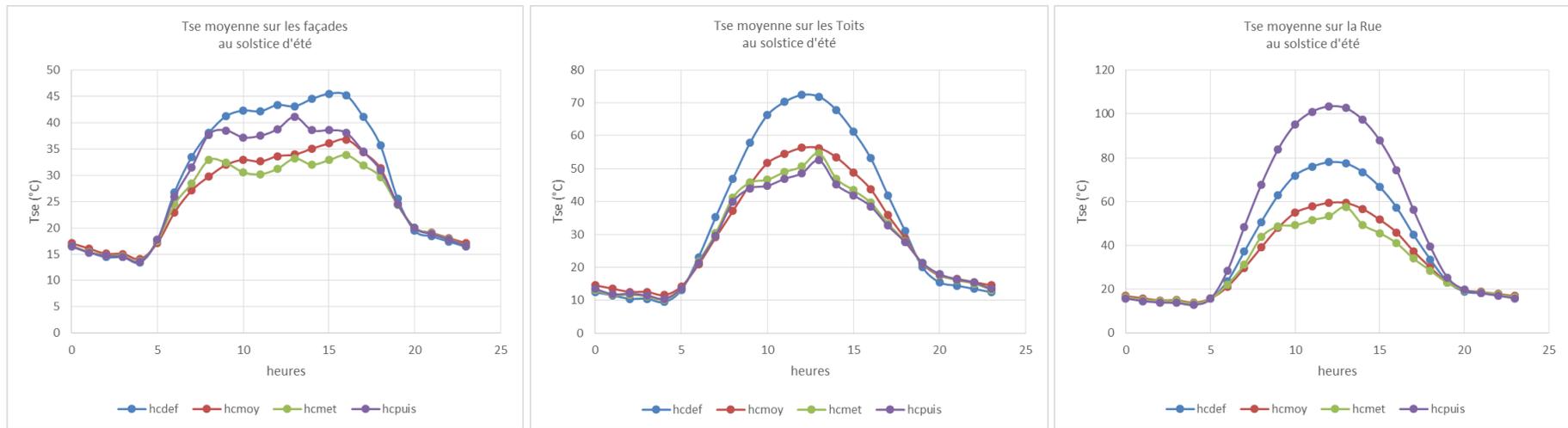


Figure 87 - Evolution horaire de des températures de surface au solstice d'été pour différents paramétrages du coefficient d'échange convectif

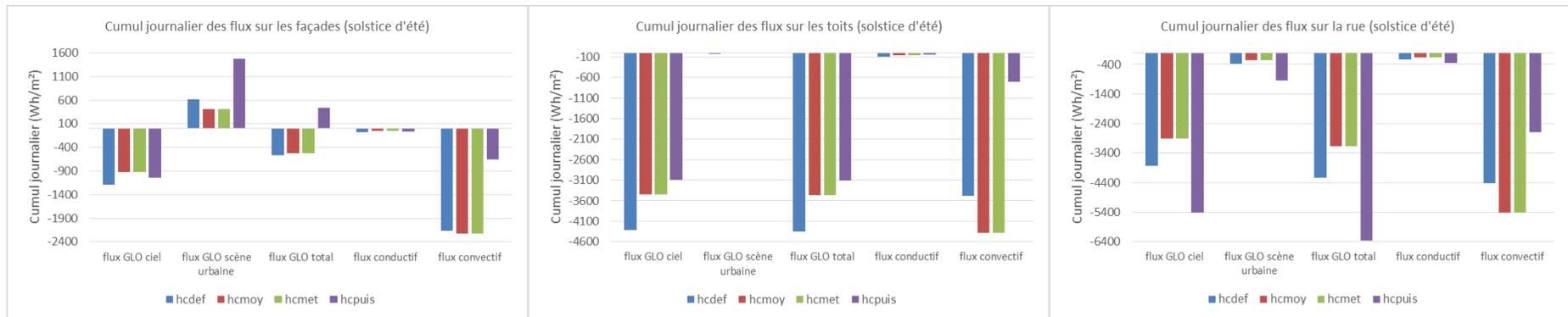


Figure 88 - Cumul journalier des flux GLO, convectif et conductif au solstice d'été pour différents paramétrages du coefficient d'échange convectif

Annexe 5. Détermination de la durée d'initialisation des simulations

La durée d'initialisation des simulations est un autre point sur lequel nous avons dû statuer en amont de notre campagne de simulation. Ces simulations nécessitent en effet une durée d'initialisation qu'il est difficile de définir à priori. Cette durée d'initialisation correspond au nombre de jours à simuler en amont de la date d'intérêt (ici les solstices) pour que les résultats à la date d'intérêt soient corrects (ne varient plus en fonction de la durée d'initialisation).

Afin de déterminer la durée d'initialisation minimum, nous avons réalisé sur le cas de base ARM_MLA_O0_Et0 des simulations de durées croissantes afin d'observer comment la durée de la période d'initialisation influence les résultats obtenus le dernier jour de simulation. Les résultats que nous observons sont les températures de surface extérieures (Tse) de chacun des triangles de la scène urbaine pour chaque pas de temps du dernier jour de simulation.

Pour la période du solstice d'hiver, nous réalisons des simulations de durées croissantes (jusqu'à sept jours) et dont le dernier jour est le 21 décembre. Nous adoptons les dénominations suivantes pour ces simulations :

- Sim0 : la journée du 21 décembre
- Sim1 : du 20 au 21 décembre
- Sim2 : du 19 au 21 décembre
- Sim3 : du 18 au 21 décembre
- Sim4 : du 17 au 21 décembre
- Sim5 : du 16 au 21 décembre
- Sim6 : du 15 au 21 décembre

Puis pour chaque jour commun à deux simulations, nous nous intéressons aux différences entre les températures de surface (en valeur absolue) obtenue pour chaque triangle de la scène urbaine. L'objectif est de juger de la stabilisation des températures de surface avec l'augmentation de la durée d'initialisation. Afin de pouvoir analyser ces résultats, nous produisons les indices suivants:

- max(moy) : maximum journalier de la moyenne sur l'ensemble des triangles de la différence de Tse observée entre deux simulations
- max(ecart_type) : le maximum journalier de l'écart type sur l'ensemble des triangles de la différence de Tse observée entre deux simulations
- max(max) : le maximum journalier du maximum sur l'ensemble des triangles de la différence de Tse observée entre deux simulations

Pour la journée du 21 (Tableau 57), on constate que localement l'on peut avoir des différences de l'ordre de 1,75°C entre sim0 et le reste des simulations. Pour ces mêmes simulations, le maximum journalier de la moyenne des différences de Tse, et le maximum journalier de l'écart type des différences de Tse sont respectivement de 0,21 °C et 0,22°C.

Pour les reste des comparaisons, c'est-à-dire l'ensemble des comparaisons entre les différentes simulations dont la durée est supérieure ou égale à 2 jours, l'ensemble des indices atteint des valeurs très faibles : max(moy) < 0,1°C, max(ecart_type) < 0,1 °C et max(max) < 0,2 °C.

Une analyse plus fine nous montre que l'essentiel des écarts sont concentrés sur les premiers pas de temps de la journée d'intérêt, comme le montre par exemple les graphes de max(moy), max(ecart_type) et max(max) entre sim0 et sim1 (Figure 89).

Ces premiers résultats nous montrent, pour la seule journée du 21 décembre, qu'une durée d'initialisation d'une journée permet d'obtenir une précision sur les températures de surface

extérieure de l'ordre de 0,1 °C. Et il faut aller jusqu'à 4 jours d'initialisation pour obtenir une précision de l'ordre de 0,01 °C.

A la fois au regard des précisions évoquées et des temps de calculs, la durée d'initialisation d'une journée nous paraît adaptée à nos études.

Il nous reste à vérifier que ce comportement au 21 décembre n'est pas un comportement particulier à cette date. Nous présentons ci-dessous les résultats pour les 20 (Tableau 58) et 19 décembre (Tableau 59), calculables à partir des mêmes simulations. On constate pour les journées du 19 et du 20 décembre des résultats parfaitement similaires à ceux observés pour le 21 décembre. Nous fixons donc pour la suite des analyses au solstice d'hiver une durée d'initialisation d'une journée.

Il nous reste à nous assurer qu'une durée d'initialisation d'une journée est également suffisante pour des simulations autour du solstice d'été. Pour ce faire nous procédons de la même manière avec des simulations de durées croissantes (jusqu'à 4 jours) et dont le dernier jour est le 20 juin 2014:

- Sim0 : la journée du 20 juin
- Sim1 : du 19 au 20 juin
- Sim2 : du 18 au 20 juin
- Sim3 : du 17 au 20 juin
- Sim4 : du 16 au 20 juin

Pour la journée du 20 juin, on constate que localement on peut avoir des différences de l'ordre de 0,2°C entre sim0 et le reste des simulations. Pour ces mêmes simulations, le maximum journalier de la moyenne des différences de Tse, et le maximum journalier de l'écart type des différences de Tse sont respectivement de 0,1 °C et 0,07°C.

Pour les reste des comparaisons, c'est-à-dire l'ensemble des comparaisons entre les différentes simulations dont la durée est supérieure ou égale à 2 jours l'ensemble des indices atteint des valeurs très faibles : $\max(\text{moy}) < 0,05^\circ\text{C}$, $\max(\text{écart_type}) < 0,05^\circ\text{C}$ et $\max(\text{max}) < 0,1^\circ\text{C}$.

Les résultats obtenus pour les 18 et 19 juin, sont parfaitement similaires. En conclusion, une durée d'initialisation d'une journée suffit également pour les analyses autour du solstice d'été.

max(moy) (°C)										max(écart type) (°C)										max(max) (°C)									
21 dec	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4	sim5	sim6	21 dec	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4	sim5	sim6	21 dec	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4	sim5	sim6						
sim0		0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	sim0		0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	sim0		1,72	1,72	1,73	1,74	1,74	1,75						
sim1			0	0	0,05	0,05	0,05	sim1			0	0	0,04	0,04	0,04	sim1			0,01	0,02	0,17	0,18	0,18						
sim2				0	0,05	0,05	0,05	sim2			0	0,04	0,04	0,04	0,04	sim2				0,01	0,16	0,17	0,17						
sim3					0,05	0,05	0,05	sim3				0,04	0,04	0,04	0,04	sim3					0,15	0,16	0,17						
sim4						0	0	sim4						0	0	sim4						0,01	0,02						
sim5							0	sim5							0	sim5							0						
sim6								sim6								sim6													

Tableau 57 - Influence de la durée d'initialisation des simulations sur le cas ARM_HVR_MLA_O0_Et0 pour le 21 décembre

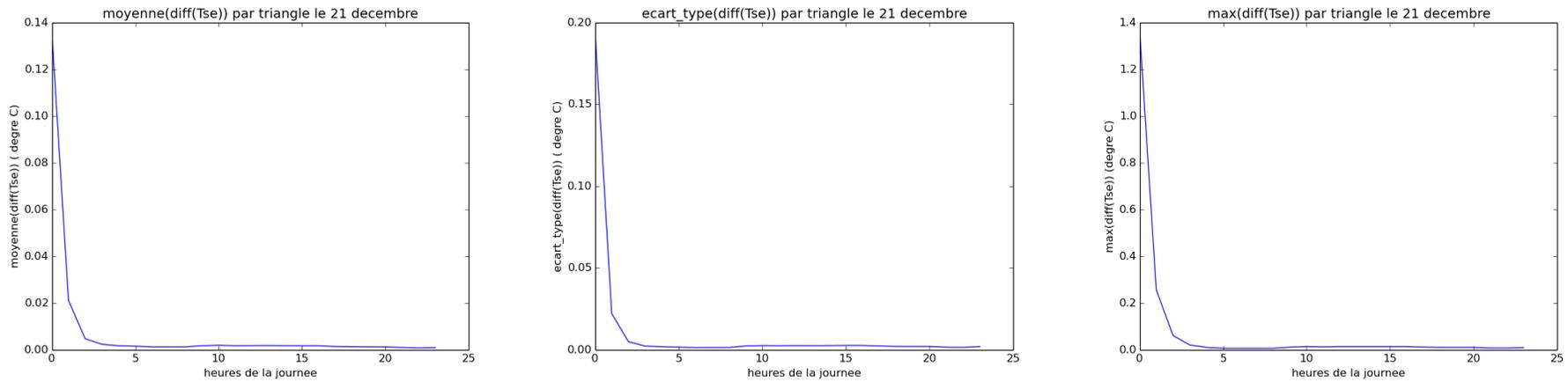


Figure 89 - Comparaison entre sim0 et sim1 pour le scénario AR%_HVR_MLA_O0_Et0

max(moy) (°C)								max(écart type) (°C)								max(max) (°C)								
20 dec	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4	sim5	sim6	20 dec	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4	sim5	sim6	20 dec	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4	sim5	sim6	
sim0								sim0								sim0								
sim1			0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	sim1			0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	sim1			1,65	1,66	1,66	1,67	1,69	
sim2				0	0	0	0	sim2				0	0	0	0	sim2				0,01	0,03	0,04	0,05	
sim3					0	0	0	sim3					0	0	0	sim3					0,01	0,03	0,03	
sim4						0	0	sim4						0	0	sim4						0,01	0,02	
sim5							0	sim5							0	sim5							0	
sim6								sim6								sim6								

Tableau 58 - Influence de la durée d'initialisation des simulations sur le cas ARM_HVR_MLA_O0_Et0 pour le 20 décembre

max(moy) (°C)								max(écart type) (°C)								max(max) (°C)							
19 dec	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4	sim5	sim6	19 dec	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4	sim5	sim6	19 dec	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4	sim5	sim6
sim0								sim0								sim0							
sim1								sim1								sim1							
sim2				0,18	0,18	0,18	0,18	sim2			0,17	0,17	0,17	0,17	sim2			1,42	1,43	1,43	1,44		
sim3					0	0,03	0,04	sim3				0	0,05	0,05	sim3				0,02	0,21	0,22		
sim4						0,03	0,03	sim4					0,05	0,05	sim4					0,2	0,21		
sim5							0	sim5						0	sim5							0	
sim6								sim6							sim6								

Tableau 59 - Influence de la durée d'initialisation des simulations sur le cas ARM_HVR_MLA_OO_Et0 pour le 19 décembre

max(moy) (°C)						max(écart type) (°C)						max(max) (°C)								
20-juin	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4	20-juin	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4	20-juin	sim0	sim1	sim2	sim3	sim4			
sim0			0,1	0,1	0,1	0,09	sim0			0,07	0,07	0,07	0,07	sim0			0,21	0,21	0,21	0,21
sim1				0,01	0,01	0,01	sim1				0	0,01	0,01	sim1				0,02	0,04	0,06
sim2					0	0,01	sim2					0	0,01	sim2					0,02	0,04
sim3						0	sim3						0	sim3						0,02
sim4							sim4							sim4						

Tableau 60 - Influence de la durée d'initialisation des simulations sur le cas ARM_ETE_MLA_OO_Et0 pour le 20 juin

