



HAL
open science

Méthode d'optimisation multicritère pour l'aide à la conception des projets de densification urbaine

Clément Ribault

► **To cite this version:**

Clément Ribault. Méthode d'optimisation multicritère pour l'aide à la conception des projets de densification urbaine. Architecture, aménagement de l'espace. Université de Lyon, 2017. Français. NNT : 2017LYSEI084 . tel-02000276

HAL Id: tel-02000276

<https://theses.hal.science/tel-02000276v1>

Submitted on 1 Feb 2019

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

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



N° d'ordre NNT : 2017LYSEI084

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
l'INSA Lyon

Ecole Doctorale N° 162
Mécanique, Energétique, Génie civil et Acoustique

Spécialité/ discipline de doctorat :
Thermique Energétique

Soutenue publiquement le 29/09/2017, par :
Clément Ribault

**Méthode d'optimisation multicritère
pour l'aide à la conception des projets
de densification urbaine**

Devant le jury composé de :

Marjorie MUSY	Directeur de Recherche (CEREMA Ouest)	Rapporteuse
Thierry DUFORESTEL	Ingénieur de Recherche, HDR (EDF R&D)	Rapporteur
Patrice JOUBERT	Professeur (ULR, La Rochelle)	Examinateur
Nadia SALLE-HOYET	Professeur (ENSAV, Versailles)	Examinatrice
Jean-Jacques ROUX	Professeur (INSA-Lyon)	Directeur de thèse
Etienne WURTZ	Directeur de Recherche (CEA)	Co-directeur de thèse
Adrien BRUN	Ingénieur de Recherche (CEA)	Invité
Gilles RUSAOUËN	Maître de Conférences (UCBL, Lyon)	Invité

Ce projet a bénéficié d'une aide de l'Etat au titre du programme d'Investissements d'avenir portant la référence (ANR-10-ITE-0003)

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://www.edchimie-lyon.fr Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 ^e etage secretariat@edchimie-lyon.fr Insa : R. GOURDON	M. Stéphane DANIELE Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Equipe CDFA 2 avenue Albert Einstein 69626 Villeurbanne cedex directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://edeea.ec-lyon.fr Sec : M.C. HAVGOUDOUKIAN Ecole-Doctorale.eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60.97 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Sec : Sylvie ROBERJOT Bât Atrium - UCB Lyon 1 04.72.44.83.62 Insa : H. CHARLES secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	M. Fabrice CORDEY CNRS UMR 5276 Lab. de géologie de Lyon Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Géode 2 rue Raphaël Dubois 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 06.07.53.89.13 cordey@univ-lyon1.fr
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE http://www.ediss-lyon.fr Sec : Sylvie ROBERJOT Bât Atrium - UCB Lyon 1 04.72.44.83.62 Insa : M. LAGARDE secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	Mme Emmanuelle CANET-SOULAS INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 avenue Jean Capelle INSA de Lyon 696621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax :04 72 68 49 16 Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES http://infomaths.univ-lyon1.fr Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal, 3 ^e étage Tél : 04.72. 43. 80. 46 Fax : 04.72.43.16.87 infomaths@univ-lyon1.fr	M. Luca ZAMBONI Bâtiment Braconnier 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél :04 26 23 45 52 zamboni@maths.univ-lyon1.fr
Matériaux	MATERIAUX DE LYON http://ed34.universite-lyon.fr Sec : Marion COMBE Tél:04-72-43-71-70 –Fax : 87.12 Bat. Direction ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIERE INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 71.70 Fax 04 72 43 85 28 Ed.materiaux@insa-lyon.fr
MEGA	MECANIQUE,ENERGETIQUE,GENIE CIVIL,ACOUSTIQUE http://mega.universite-lyon.fr Sec : Marion COMBE Tél:04-72-43-71-70 –Fax : 87.12 Bat. Direction mega@insa-lyon.fr	M. Philippe BOISSE INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72 .43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 Philippe.boisse@insa-lyon.fr
ScSo	ScSo* http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/ Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS Insa : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04 78 69 72 76 viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr	M. Christian MONTES Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Christian.montes@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

« Semez le béton, vous aurez la dalle ! »

La Charrette du Potager, Chambéry, 2016.

« Il n'est pas d'exemple de civilisation florissante sans une agriculture prospère. »

Philippe Desbrosses : *Le Krach alimentaire - « nous redeviendrons paysans »*, Le Rocher, 1989.

« Un autre monde existe, il est dans celui-ci. »

Paul Éluard : *L'Amour la poésie*, Gallimard, 1929.

Avant-propos

Les travaux que je présente dans les pages qui suivent ont été réalisés au sein du Laboratoire de Gestion Énergétique du Bâtiment (LGEB), qui appartient au Service Bâtiment et Systèmes Thermiques (SBST) du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. Le SBST est installé à l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES), au Bourget-du-Lac. Je remercie Arnaud JAY et Olivier FLECHON, respectivement chefs du LGEB et du SBST, pour m'avoir bien accueilli et intégré dans leur équipe, en particulier Arnaud que j'ai davantage cotoyé. Au cours de ces trois années de thèse, je faisais également partie du Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL), dirigé par Jocelyn BONJOUR.

J'ai bénéficié d'une équipe d'encadrement riche avec Jean-Jacques ROUX, Professeur à l'INSA de Lyon, comme directeur de thèse et Etienne WURTZ, Directeur de Recherche au CEA, comme co-directeur de thèse. J'étais également suivi par Adrien BRUN, ingénieur de recherche au CEA et Gilles RUSAOUEN, Maître de Conférences à l'Université Claude Bernard Lyon 1. Je tiens à les remercier tous les quatre pour la confiance et le temps qu'ils m'ont accordés, ainsi que les conversations constructives que nous avons eues lors de nos comités de thèse. Je remercie Etienne WURTZ pour avoir su se rendre disponible pour moi dès que j'en avais besoin, et ce malgré un emploi du temps très chargé.

J'adresse de très chaleureux remerciements à Adrien BRUN pour son encadrement exemplaire lié à ses qualités humaines et professionnelles, à la fois très attentif tout en me laissant toute la liberté dont j'avais besoin, toujours à l'écoute et disponible au bon moment. En regardant dans le rétroviseur je me rends compte du nombre incalculable d'heures passées à travailler ensemble, à discuter de détails qui en fin de compte n'étaient pas négligeables, et à adapter mes ambitions initiales à la réalité de mon avancement. Nos échanges professionnels ont été précieux pour moi et m'ont largement aidé à aller jusqu'au bout de cette thèse. J'ai également beaucoup apprécié nos échanges moins professionnels, des fous rires en réunion de labo aux conversations sur des thèmes très variés à l'occasion de différents trajets, trop rares à mon goût.

Cette thèse s'est terminée par une soutenance qui fut un exercice très agréable pour moi grâce aux remarques constructives du jury, dont je remercie tous les membres, et spécialement Patrice JOUBERT, Professeur à l'Université de La Rochelle, pour en avoir assuré la présidence. J'ai été honoré que Marjorie MUSY, Directrice de Recherche au CEREMA Ouest et Thierry DUFORESTEL, Ingénieur de Recherche HDR à EDF R&D acceptent de rapporter cette thèse et de faire partie de ce jury. Les avis et conseils formulés de façon positive dans leurs rapports m'ont vraiment aidé à préparer cette soutenance. J'ai aussi été ravi que Nadia SALLE-HOYET, Professeure à l'ENSAV, accepte d'être examinatrice de cette thèse après trois années de collaboration autour du projet MERUBBI. J'en profite pour remercier tous les partenaires de MERUBBI pour ces échanges enrichissants que nous avons eus au cours de nos réunions, qui ont fortement contribué à donner du

sens à mon travail. Je suis reconnaissant envers Mathieu SCHUMANN et Mathias BOUQUEREL pour leurs réponses détaillées à mes nombreuses questions.

Merci à mes collègues du SBST, et plus particulièrement à mes voisines et voisins de bureaux (il y a eu plusieurs bureaux) pour leur accueil et les diverses discussions qui ont agrémenté mes journées. J'ai par ailleurs beaucoup aimé la solidarité qui s'est tissée entre les doctorantes et doctorants du SBST, matérialisée par des retrouvailles autour d'un café ou d'une bière dès que le besoin de se parler à cœur ouvert se faisait ressentir. Ces bulles d'air m'ont fait du bien dans les moments difficiles.

Merci aussi à mes ex-collègues de la Plateforme Formation et Evaluation de l'INES, devenus des amis. Les six mois passés parmi vous m'ont donnés envie de continuer mes aventures à l'INES, et vous retrouver le midi (et parfois le soir) pendant les trois années qui ont suivi a toujours été un grand plaisir.

Ces trois dernières années ont certes été bien remplies par les travaux de thèse présentés dans ce document, mais elles m'ont aussi permis d'évoluer et de prendre le temps de réfléchir à ce que je voulais faire de ma vie. Je tiens ici à remercier Leïla, ma famille et mes amis, de Chambéry et d'ailleurs, pour leur soutien dans ce cheminement. J'ai à ce propos une pensée particulière pour Alain, tuteur de stage de rêve qui m'a fait découvrir - entre autres - la très chouette AMAP de l'Albanne. C'est à travers elle que j'ai connu Aline et Olivier, qui m'ont donné envie de devenir paysan. Un grand merci à eux !

Pour finir, merci à Chloïc ainsi qu'à Rémy et Rémi (alias Kiki) à la fois confidents, compagnons de randonnée et de découvertes gastronomiques... Ma vie à Chambéry aurait été bien fade sans vous ! Ceci est aussi valable pour la légendaire Cychloïc, qui m'a offert de belles tranches de rêve !

Résumé

La population mondiale fait face, globalement, à une urbanisation expansive. Cet étalement urbain, souvent mal contrôlé, menace aussi bien l'environnement que la santé, la qualité de vie et la sécurité alimentaire des humains. Il est possible de le limiter en lui préférant la densification urbaine. Néanmoins, la complexité des phénomènes en jeu dans un tel contexte nous incite à penser que les responsables d'opérations de densification urbaine ont besoin d'outils pour les aider à faire les choix les plus pertinents possibles. Dans un premier temps, l'état de l'art présenté dans cette thèse montre que l'outil idéal n'existe pas, et que l'optimisation multicritère par algorithme génétique est une technique adaptée à l'aide à la conception de bâtiments. Les caractéristiques souhaitables pour une méthode d'assistance des concepteurs de projets de densification urbaine sont alors précisées. Nous recommandons de baser cette méthode sur le couplage entre un algorithme génétique et un outil capable de réaliser des simulations thermiques dynamiques (STD) de quartiers. Les capacités des logiciels de STD Pleiades+COMFIE (P+C) et EnergyPlus (E+) sont situées par rapport à ces exigences, puis un premier test d'optimisation d'un projet de densification urbaine en associant EnergyPlus à un algorithme génétique est présenté. Certaines lacunes de cette méthode peuvent être comblées par la plateforme en cours de développement dans le projet ANR MERUBBI.

Dans un second temps, nous analysons donc les résultats d'une étude comparative entre P+C, E+ et l'outil MERUBBI, menée sur un projet de densification d'un îlot à forte densité urbaine. Ils montrent que ce dernier est fiable et particulièrement pertinent pour l'évaluation précise des interactions entre bâtiments. Dans un troisième temps, nous abordons la problématique de la diminution des temps de calcul, enjeu crucial pour que notre méthode d'aide à la conception soit réellement accessible aux professionnels du bâtiment. Nous proposons une technique de réduction de la période de simulation que nous présentons en détail. Enfin, la méthode d'optimisation développée est appliquée à la résolution de différents problèmes de conception du projet sus-cité, en utilisant E+. Nous montrons en quoi l'utilisation de l'outil MERUBBI enrichira cette approche, avant de conclure sur des perspectives de développement de notre méthode pour améliorer son interactivité.

Abstract

The world's population is facing an expansive urbanization. This urban sprawl, which is often not well managed, is endangering the environment as well as human health, quality of life and food security. It can be controlled by favouring urban densification. Nonetheless, the complexity of the phenomena involved in such a context leads us to think that supervisors of urban densification operations need some tools to help them make the most relevant choices. This thesis begins with a literature review that shows the ideal tool does not exist, and explains why multi-objective optimization using a genetic algorithm is a suitable technique for building design aid. Then we clarify the desirable features of an assistance method for urban densification projects designers. We recommend to base this method on the coupling of a genetic algorithm with a district-scale dynamic thermal simulation (DTS) tool. We compare capabilities of EnergyPlus (E+) and Pleiades+COMFIE (P+C) DTS software with these requirements, then we present a first urban densification project optimization test associating EnergyPlus with a genetic algorithm. The platform under development in the ANR MERUBBI project can offset certain shortcomings of this method.

Hence, in a second phase we analyze the results of a comparative study of P+C, E+ and the MERUBBI tool, carried out using a high-density district densification project as a test case. It shows that the latter is reliable and particularly relevant to precisely assess interactions between buildings. In a third phase we address the problematic of reducing the computing time, a major issue to make our design aid method truly accessible to building professionals. We propose a way of reducing the operating period length and present it in detail. Finally, our optimization method is used to solve various design problems of the above-mentioned project, using E+. We show how the use of the MERUBBI platform will enrich this approach before concluding with development ideas to make our method more user-friendly and interactive.

Table des matières

Avant-propos	iii
Résumé	v
Abstract	vii
Liste des figures	xvii
Liste des tableaux	xxi
Liste des symboles	xxiii
Introduction	1
I Des prémices de l'architecture bioclimatique à l'optimisation énergétique à l'échelle du quartier	3
1 Introduction	4
2 Méthodes d'optimisation multicritère et application au domaine du bâtiment	4
2.1 Présentation générale des méthodes d'optimisation	4
2.2 Algorithmes évolutionnaires	5
2.3 Optimisation multiobjectif et aide à la décision	8
2.3.1 Méthodes agrégées	8
2.3.2 Méthodes non-agrégées	9
2.3.3 Méthodes interactives	11
2.4 Intérêt des algorithmes génétiques pour l'optimisation de bâtiments	11
2.5 Intérêt de l'algorithme génétique NSGA-II	12
3 Bioclimatisme : évolution des méthodes et échelles d'application	13
3.1 A l'échelle du bâtiment	13
3.1.1 Origines et évolution de la démarche	13
3.1.2 Applications modernes : exemples d'optimisations	15
3.2 A l'échelle du quartier	19
3.2.1 Evaluation du potentiel solaire	19
3.2.2 Utilisation d'outils de simulation thermique dynamique à l'échelle urbaine	22
3.2.3 Outils d'évaluation du microclimat urbain	25
3.2.4 Etudes d'impact du contexte urbain sur le bilan énergétique des bâtiments	26
3.3 Vers l'optimisation à l'échelle urbaine	28
4 Synthèse	32

II Pertinence des outils existants pour une intégration dans une méthode d'optimisation de la conception d'un bâtiment neuf dans un îlot urbain	35
1 Introduction	36
2 Caractéristiques attendues pour un outil pertinent	36
2.1 Utilité pour l'aide à la décision	36
2.1.1 Concordance entre l'outil et les besoins des utilisateurs potentiels	37
2.1.2 Accessibilité	39
2.2 Attentes d'une plateforme de simulation quartier	41
2.2.1 Prise en compte des phénomènes physiques prépondérants à cette échelle	41
2.2.2 Adaptation des modèles au degré de connaissance des bâtiments	44
3 Positionnement des outils existants vis-à-vis du besoin exprimé	46
3.1 Outils de STD existants et usages courants	46
3.1.1 Pleiades+COMFIE	46
3.1.2 EnergyPlus	51
3.2 Outils spécifiques pour des études à l'échelle du quartier ou de la ville	54
3.3 Etude de faisabilité : optimisation d'un projet de densification avec un outil de STD	55
3.3.1 Modélisation du cas d'étude	56
3.3.2 Résultats des STD	58
3.3.3 Optimisation multicritère	60
3.3.4 Bilan	65
4 Positionnement du projet ANR MERUBBI	66
4.1 De la définition d'indicateurs de potentiel et de performance bioclimatiques...	66
4.2 ...à leur utilisation pour l'évaluation de projets de densification urbaine	68
5 Synthèse	70
III Un outil adapté à notre problématique : la plateforme MERUBBI	73
1 Introduction	74
2 Description de la plateforme	74
2.1 Lecture et traduction de la maquette du projet	75
2.2 Evaluations énergétique, économique et bioclimatique	77
2.3 Optimisation multicritère	77
2.4 SOLENE-Microclimat et la plateforme MERUBBI	78
3 Evaluation multilogiciel de la densification d'un quartier à forte densité urbaine	79
3.1 Description du cas « Strasbourg Dense »	79
3.2 Modélisations géométriques	81
3.3 Mise en données des modèles	83
3.3.1 Composition de l'enveloppe des bâtiments	83

3.3.2	Charges internes	85
3.3.3	Chauffage, refroidissement et renouvellement d'air	85
3.3.4	Coefficients de transfert convectif	86
3.3.5	Echanges radiatifs CLO et détail des versions considérées	86
3.4	Evaluation de l'opération de densification	88
3.4.1	Impacts du bâtiment neuf sur les bâtiments existants	88
3.4.2	Impacts de l'environnement urbain sur le bâtiment neuf	91
3.4.3	Commentaires	95
3.5	Comparaison des résultats obtenus avec les différents outils, version 0	96
3.5.1	Besoins énergétiques du bâtiment neuf	96
3.5.2	Besoins énergétiques des bâtiments existants	97
3.5.3	Commentaires	99
3.6	Impacts de l'enrichissement des modèles, versions 0, 1a, 1b et 2	101
3.6.1	Résultats obtenus avec les différentes versions	101
3.6.2	Commentaires	109
4	Synthèse	110
IV	Capacités actuelles et pistes d'amélioration de la méthode d'optimisation de la conception	113
1	Introduction	114
2	Diminution des temps de calcul	115
2.1	Réduction de la période de simulation	116
2.1.1	Introduction	116
2.1.2	Regroupement des journées par groupes : technique du k-means clustering	117
2.1.3	Construction de la séquence réduite	119
2.1.4	Evaluation de la qualité de la séquence réduite obtenue	124
2.2	Perspectives de développement	128
2.2.1	Réduction de la période de simulation d'un projet de densification urbaine en vue de l'optimisation multicritère de sa conception	128
2.2.2	Autres pistes pour la réduction du temps de calcul	129
3	Application de la méthode d'optimisation au projet « Strasbourg Dense » et pistes de développement	132
3.1	Présentation des problèmes d'optimisation considérés	132
3.1.1	Espace des possibles	132
3.1.2	Paramétrage de l'algorithme	134
3.2	Résultats des optimisations réalisées en couplant E+ et NSGA-II	138
3.2.1	Minimisation des besoins énergétiques	138
3.2.2	Prise en compte de l'éclairage naturel	149
3.2.3	Commentaires	156

3.3	Développements en cours au sein du projet MERUBBI	158
3.3.1	Espace des possibles	158
3.3.2	Optimisation énergétique et bioclimatique	159
3.3.3	Vers l'intégration de la performance économique	161
3.4	Pistes pour enrichir le dialogue avec les utilisateurs	162
3.4.1	Traitement automatique des résultats des optimisations	162
3.4.2	Algorithme génétique interactif	164
4	Synthèse	166
	Conclusions	169
	Perspectives	171
	Bibliographie	173

Liste des figures

I.1	Illustration du croisement de deux quartiers selon des bandes nord-sud - tirée de Vermeulen, 2014 [15].	7
I.2	Schéma de principe d'un algorithme évolutionnaire.	8
I.3	Exemple de relation de dominance au sens de Pareto - tiré de Berro, 2001 [11].	10
I.4	Fronts de Pareto pour un problème de minimisation de deux critères - tirés de Rivallain, 2013 [29].	10
I.5	Illustration du calcul de la distance de peuplement - tirée de Le Riche <i>et al.</i> , 2015 [46].	13
I.6	Photographies des façades nord et sud de la maison Jacobs II - tirées de Jacobs, 1978 [48].	14
I.7	Schéma simplifié d'un mur Trombe - d'après Saadatian <i>et al.</i> , 2012 [50].	14
I.8	Optimisation de la disposition de fenêtres sur une façade - d'après Wright <i>et al.</i> , 2014 [57].	16
I.9	Exemple de modèle de toiture traité par la méthode ParaGEN - tiré de Turrin <i>et al.</i> , 2011 [61].	17
I.10	Comparaison entre le bâtiment avant et après optimisation, en été et en hiver - tirée de Yi et Malkawi, 2009 [64].	18
I.11	Illustration de l'angle d'obstruction présenté dans la méthode LT - tirée de Vermeulen, 2014 [15].	19
I.12	Application du concept d'enveloppe solaire à un quartier de Los Angeles - tirée de Knowles, 2003 [71].	20
I.13	Illustration du volume solaire défini par la SRE (en bleu) et la SCE (en rose) - tirée de Capeluto et Shaviv, 1997 [72].	20
I.14	Aperçu d'IRS modélisées pour une parcelle de Milan, basées sur une irradiation de 260 W/m ² - tiré de Ratti et Morello, 2005 [76].	21
I.15	Analyse du confort extérieur dans un quartier de Boston avec UMI - d'après Reinhart, 2013 [83].	23
I.16	Niveaux d'éclairement naturel pour un bâtiment seul (gauche) et encadré de deux masques solaires (droite), calculés avec P+C - d'après Ribault, 2014 [92].	25

I.17	Distribution des coefficients de transfert convectif extérieur dans un quartier de Strasbourg, calculés avec Solene-Microclimat - tirée de Morille <i>et al.</i> , 2015 [93].	26
I.18	Irradiation solaire incidente sur le site (en kWh.m ⁻²) avec le bâtiment seul (a) puis entouré de son environnement urbain (b) - d'après Good <i>et al.</i> , 2014 [9].	27
I.19	Résultats de deux minimisations par algorithme génétique du bilan énergétique total d'un quartier pour une densité comprise entre 280 et 320 hab./ha - d'après Arantes, 2013 [104].	29
I.20	Solution topologique maximisant le potentiel solaire pour un ensemble de 9 bâtiments - tirée de Conceição António <i>et al.</i> , 2014 [107].	30
I.21	Extrait de la population finale obtenue - d'après Dillenburger <i>et al.</i> , 2009 [108].	31
I.22	Solution permettant de minimiser les besoins de chauffage d'un îlot urbain (variables : hauteur des bâtiments) - d'après Vermeulen, 2014 [15].	32
I.23	Géométrie du contexte urbain - d'après Echenagucia <i>et al.</i> , 2015 [111].	32
II.1	Exemple d'affichage de populations d'individus et des élites conservées - tiré de Marin, 2010 [14].	40
II.2	Illustration des deux cas étudiés : bâtiment seul (à gauche) et îlot (à droite) - d'après Ribault, 2014 [92].	42
II.3	Evolution des besoins de chauffage en fonction de la distance entre bâtiments - tirée de Ribault, 2014 [92].	42
II.4	Evolution des besoins de climatisation en fonction de la distance entre bâtiments - tirée de Ribault, 2014 [92].	43
II.5	Eclairement des parois incident total et absorbé après inter-réflexions - d'après Bozonnet, 2005 [80].	44
II.6	Représentation en 3D du modèle du quartier avec Alcyone - tirée de Ribault, 2014 [92].	47
II.7	Évolution mensuelle des taux, de la consommation et de la production d'énergie - tirée de Ribault, 2014 [92].	48
II.8	Représentation du cas d'étude, avec le bâtiment simulé au centre, pour le niveau de densité le plus faible (a) et le plus élevé (b) - tirée de Gracik <i>et al.</i> , 2015 [128].	52
II.9	Maquettes des bâtiments neufs au sein du site (à gauche) et seuls (à droite), réalisées avec SketchUp par les étudiants de l'ENSAV.	56
II.10	Modèles des cas BN (à gauche) et BN_M (à droite) réalisés avec le <i>plug-in</i> OpenStudio pour SketchUp.	57

II.11	Modèles des bâtiments neufs entourés des bâtiments existants (cas BN_QE, à gauche) et des bâtiments existants seuls (cas QE, à droite) réalisés avec le plug-in OpenStudio pour SketchUp.....	57
II.12	Résultats obtenus pour la minimisation des besoins énergétiques d'une pièce de bureau.	61
II.13	Résultats obtenus pour la minimisation des besoins de chauffage et de refroidissement des bâtiments neufs du cas BN_M.	63
II.14	Résultats obtenus pour la minimisation des besoins énergétiques des bâtiments neufs et de ceux de l'îlot (cas BN_QE).	64
III.1	Schéma de fonctionnement de la plateforme MERUBBI.	75
III.2	Aperçu du quartier existant avec Google Earth (a) et du quartier modélisé par les étudiants (b).	80
III.3	Aperçus des maquettes 3D du bâtiment neuf seul (a) et intégré dans l'îlot existant (b) après importation dans SketchUp.	80
III.4	Modèles ED (a) et P (b) réalisés avec le <i>plug-in</i> d'OpenStudio pour SketchUp.....	82
III.5	Modèles PwS (a) et PinED (b) réalisés avec le <i>plug-in</i> d'OpenStudio pour SketchUp.	82
III.6	Modèle PinED dans Alcyone (a) et dans l'interface graphique de PT_M (b).	83
III.7	Modèle PinED avec une coloration en rose pour les parois adiabatiques, non exposées au vent et au soleil.	85
III.8	Vue du dessus du modèle PinED avec la numérotation des bâtiments du quartier. ...	90
III.9	Estimation de l'impact de l'implantation du bâtiment neuf sur les besoins de chauffage des bâtiments existants en comparant les résultats obtenus avec la PFM pour la version 2 des modèles ED (bâtiments existants seuls) et PinED (bâtiments existants + bâtiment neuf).	90
III.10	Estimation de l'impact de l'implantation du bâtiment neuf sur les besoins de refroidissement des bâtiments existants en comparant les résultats obtenus avec la PFM pour la version 2 des modèles ED (bâtiments existants seuls) et PinED (bâtiments existants + bâtiment neuf).	91
III.11	Comparaisons des besoins de chauffage (a) et de refroidissement (b) de chaque étage du bâtiment neuf obtenus avec la PFM pour la version 2 des modèles P (bâtiment neuf seul) et PinED (bâtiment neuf + bâtiments existants).	93
III.12	Comparaisons des besoins de chauffage (a) et de refroidissement (b) de chaque étage du bâtiment neuf obtenus avec la PFM pour la version 0 des modèles P (bâtiment neuf seul) et PinED (bâtiment neuf + bâtiments existants).	94

III.13	Besoins de chauffage (a) et de refroidissement (b) des bâtiments existants obtenus avec les trois outils pour le modèle ED, version 0.	97
III.14	Comparaisons des besoins de chauffage (a) et de refroidissement (b) des bâtiments existants obtenus avec les trois outils pour le modèle PinED, version 0.	99
III.15	Comparaisons des besoins de chauffage (a) et de refroidissement (b) du bâtiment neuf obtenus avec la PFM pour les différentes versions des modèles P et PinED.	104
III.16	Besoins de chauffage des bâtiments existants obtenus avec la PFM pour les différentes versions du modèle PinED.	108
III.17	Besoins de refroidissement des bâtiments existants obtenus avec la PFM pour les différentes versions du modèle PinED.	109
IV.1	Temps de calcul de la STD avec E+ en fonction du nombre de jours simulés, pour un bâtiment simple (a), une maison INCAS (b) et le modèle PinED du projet « Strasbourg Dense » (c).	116
IV.2	Ensemble des profils de besoins énergétiques journaliers initiaux (a) et journées types obtenues avec l'algorithme k-means paramétré pour constituer 15 groupes (b).	119
IV.3	Ensemble des profils de besoins journaliers sur l'année, colorés selon le groupe auquel ils appartiennent à la sortie du processus de partitionnement.	123
IV.4	Performances de toutes les coupes testées lors de la première itération.	124
IV.5	Ensemble des profils journaliers conservés à l'issue de la première itération.	124
IV.6	Performances de l'ensemble des coupes testées lors de la cinquième itération.	125
IV.7	Ensemble des profils journaliers obtenus après la coupe retenue au cours de la quatrième itération.	125
IV.8	Aperçu des 108 configurations testées, obtenues par variation des tailles et positions du vitrage et de la casquette à partir de la pièce de bureau étudiée	127
IV.9	Représentation de l'hypervolume d'un ensemble de trois points non dominés, avec r comme point de référence, pour un problème de minimisation de deux fonctions objectifs, tirée de Fonseca <i>et al.</i> , 2006 [149].	136
IV.10	Augmentation de l'hypervolume lors de l'intensification (gauche) ou de la diversification (droite) de l'ensemble de solutions étudié, tirée de Recht, 2016 [121].	137
IV.11	Optimisation n°1 : nombre de doublons obtenu pour chacune des générations.	139
IV.12	Optimisation n°1 : valeur de l'hypervolume de la population obtenue pour chacune des générations.	140

IV.13	Optimisation n°1 : fronts de Pareto obtenus pour les populations des générations 2 et 3.	140
IV.14	Optimisation n°1 : front de Pareto obtenu pour la population de la génération 30 et individu initial, avant optimisation.	141
IV.15	Position du bâtiment 15 dans le quartier et par rapport au bâtiment neuf, dans le modèle PinED réalisé avec le <i>plug-in</i> d'OpenStudio pour SketchUp.	143
IV.16	Optimisation n°2 : front de Pareto obtenu pour la population de la génération 30 et individu initial, avant optimisation.	143
IV.17	Optimisation n°3 : front de Pareto obtenu pour la population de la génération 16 et individu initial.	145
IV.18	Optimisation n°4 : valeur de l'hypervolume de la population obtenue pour chacune des générations.	146
IV.19	Optimisation n°4 : individu initial, avant optimisation et fronts de Pareto obtenus pour la population des générations 18 et 30.	146
IV.20	Position des points de référence pour le contrôle de l'éclairage artificiel, par rapport aux façades nord, ouest et est au dernier étage du bâtiment neuf.	150
IV.21	Optimisation n°5 : individu initial, avant optimisation et front de Pareto obtenu pour la population de la génération 22.	151
IV.22	Optimisation n°6, avec la minimisation de la chaleur dégagée par l'éclairage électrique à la place de la minimisation des besoins de refroidissement : front de Pareto obtenu pour la population de la génération 26.	154
IV.23	Modèle simplifié de « Nantes Moyennement Dense » réalisé avec SketchUp par des élèves de l'ENSAV.	160
IV.24	Front de Pareto obtenu pour la population de la génération 69, test d'optimisation avec NSGA-II et Dymola-BuildSysPro.	161
IV.25	Solution d'un problème de tournée de véhicules avec 20 clients à livrer et 4 véhicules disponibles, annotée par l'utilisateur - tirée de Ben Ismail <i>et al.</i> , 2012.	165

Liste des tableaux

III.1	Noms et descriptions des quatre modèles créés.	82
III.2	Coefficients de déperdition thermique des parois et fenêtres $[W/(m^2.K)]$ des bâtiments modélisés.	84
III.3	Coefficients de transfert convectif des parois des bâtiments modélisés.	86
III.4	Possibilités de modélisation des échanges radiatifs CLO avec les outils étudiés.	87
III.5	Caractéristiques des versions étudiées.	87
III.6	Besoins énergétiques $[kWh/(m^2.an)]$ de l'ensemble des bâtiments existants obtenus pour chaque version des modèles ED (sans le bâtiment neuf) et PinED (avec le bâtiment neuf), avec les outils concernés.	89
III.7	Écarts relatifs $[%]$ entre les besoins énergétiques agrégés sur l'ensemble des bâtiments existants obtenus avec les modèles ED et PinED, pour toutes les versions, avec les outils concernés.	89
III.8	Écarts absolus $[kWh/(m^2.an)]$ entre les besoins énergétiques agrégés sur l'ensemble des bâtiments existants obtenus avec les modèles ED et PinED, pour toutes les versions, avec les outils concernés.	89
III.9	Besoins énergétiques $[kWh/(m^2.an)]$ du bâtiment neuf obtenus pour chaque version des modèles P et PinED, avec les outils concernés.	92
III.10	Écarts relatifs $[%]$ entre les besoins énergétiques agrégés sur l'ensemble du bâtiment neuf obtenus avec les modèles P (bâtiment neuf seul) et PinED (bâtiment neuf + bâtiments existants), pour toutes les versions, avec les outils concernés.	92
III.11	Écarts absolus $[kWh/(m^2.an)]$ entre les besoins énergétiques agrégés sur l'ensemble du bâtiment neuf obtenus avec les modèles P (bâtiment neuf seul) et PinED (bâtiment neuf + bâtiments existants), pour toutes les versions, avec les outils concernés.	92
III.12	Besoins énergétiques $[kWh/(m^2.an)]$ obtenus avec les trois outils pour l'ensemble du bâtiment neuf, modèle P, version 0.	96
III.13	Besoins énergétiques $[kWh/(m^2.an)]$ obtenus avec les trois outils pour l'ensemble du bâtiment neuf, modèle PinED, version 0.	96
III.14	Écarts relatifs entre les besoins énergétiques obtenus avec les trois outils pour l'ensemble des bâtiments existants du quartier, modèle ED, version 0.	98

III.15	Écarts absolus entre les besoins énergétiques obtenus avec les trois outils pour l'ensemble des bâtiments existants du quartier, modèle ED, version 0.	98
III.16	Écarts relatifs entre les besoins énergétiques obtenus avec les trois outils pour l'ensemble des bâtiments existants du quartier, modèle PinED, version 0.	98
III.17	Écarts absolus entre les besoins énergétiques obtenus avec les trois outils pour l'ensemble des bâtiments existants du quartier, modèle PinED, version 0.	99
III.18	Temps de calcul obtenus pour l'évaluation énergétique de chaque modèle avec P+C (version 0).	101
III.19	Temps de calcul obtenus pour l'évaluation énergétique de chaque version de chaque modèle avec E+.	102
III.20	Temps de calcul obtenus pour l'évaluation énergétique de chaque version des modèles P et PwS avec la PFM.	102
III.21	Temps de calcul obtenus pour l'évaluation énergétique de chaque version des modèles PinED et ED avec la PFM.	103
III.22	Rappel des besoins énergétiques [kWh/(m ² .an)] du bâtiment neuf obtenus pour chaque version des modèles P et PinED, avec les outils concernés.	103
III.23	Besoins énergétiques [kWh/(m ² .an)] du bâtiment neuf obtenus avec E+ et la PFM pour les versions 1a, 1b, et 2 des modèles PwS et PinED.	105
III.24	Écarts absolus [kWh/(m ² .an)] entre les besoins énergétiques du bâtiment neuf obtenus avec les modèles PwS et PinED, pour les versions 1a, 1b et 2.	105
III.25	Besoins énergétiques [kWh/(m ² .an)] de l'ensemble des bâtiments existants obtenus pour chaque version des modèles ED et PinED, avec les outils concernés.	107
III.26	Écarts absolus [kWh/(m ² .an)] entre les besoins énergétiques de l'ensemble des bâtiments existants obtenus pour chaque version des modèles ED et PinED, avec les outils concernés.	107
IV.1	Valeurs des variables éligibles pour l'optimisation de la conception du bâtiment neuf du modèle PinED.	134
IV.2	Description des types de vitrages, qui correspondent aux valeurs que peut prendre la variable $Type_w$ si elle est choisie pour l'optimisation.	134
IV.3	Optimisation n°1 : valeurs des variables des paires d'individus du front de Pareto final ayant les mêmes valeurs pour toutes les variables sauf une.	141
IV.4	Optimisation n°1 : comparaison des caractéristiques de deux paires d'individus, une du front de Pareto final (n°16 et 17) et une du front de Pareto de la génération 26 (n°1 et 2).	142

IV.5	Optimisation n°2 : caractéristiques des paires d'individus du front de Pareto final ayant les mêmes valeurs pour toutes les variables sauf une.	144
IV.6	Optimisation n°4 : besoins énergétiques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 30 et de l'individu initial.	147
IV.7	Optimisation n°4 : valeurs des variables non géométriques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 30 et de l'individu initial.	147
IV.8	Optimisation n°4 : valeurs des variables géométriques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 30 et de l'individu initial.	148
IV.9	Optimisation n°5 : besoins énergétiques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 22 et de l'individu initial modifié.	151
IV.10	Optimisation n°5 : valeurs des variables Γ_{Murs} , $ep_{IsolMurs}$ et Γ_{BS} des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 22 et de l'individu initial modifié.	152
IV.11	Optimisation n°5 : valeurs des variables non géométriques des vitrages des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 22 et de l'individu initial modifié.	152
IV.12	Optimisation n°5 : valeurs des variables géométriques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 22 et de l'individu initial modifié.	152
IV.13	Optimisation n°6 : besoins énergétiques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 26 et de l'individu n°10.	154
IV.14	Optimisation n°6 : valeurs des variables non géométriques des vitrages des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 26 et de l'individu n°10.	155
IV.15	Optimisation n°6 : valeurs des variables géométriques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 26 et de l'individu n°10.	155
IV.16	Valeurs des variables et performances des individus n°1, 36 et 77 du front de Pareto de la génération 69, test d'optimisation avec NSGA-II et Dymola-BuildSysPro.	161

Liste des symboles

Lettres grecques

α	Absorptivité solaire du matériau de surface extérieure	
Γ_{BS}	Albedo des brise-soleil verticaux des murs du bâtiment neuf	
Γ_{Murs}	Albedo du revêtement extérieur des murs du bâtiment neuf	
λ	Nombre de parents choisis pour la phase de reproduction de l'algorithme génétique	
μ	Nombre d'individus dans la population courante	
τ	Taux	%
τ_{SV}	Ratio de surface vitrée à chaque étage pour chaque façade	%
θ	Écart relatif	%

Lettres latines

a	Grandeur observée	
A	Nombre de grandeurs observées	
b	Besoins du bâtiment à chaque instant	W
B	Besoins annuels du bâtiment	kWh/an
B_{jour}	Besoins journaliers du bâtiment	kWh/jour
d_i^n	Distance de peuplement partielle de l'individu i selon l'objectif f_n	
d_i	Distance de peuplement totale de l'individu i	
d_{suppr}	Date de début de la séquence supprimée	
ep	Épaisseur d'isolant	m
$ep_{IsolMurs}$	Épaisseur de la couche d'isolation thermique contenue dans les parois verticales du bâtiment neuf	m
f	Fonction objectif	
FS	Facteur solaire des vitrages	
hc	Coefficient de transfert convectif	W/(m ² .K)
I_{DIV}	Indicateur de diversité	
I_{DM}	Indicateur de durée minimale des sous-séquences S_s	
I_{INIT}	Indicateur d'initialisation	
I_L	Indicateur de liaison	
I_R	Indicateur de représentativité	
J	Nombre de profils journaliers	
$Jg(k)$	Nombre de journées appartenant au $k^{\text{ième}}$ groupe	
$Jg^*(k)$	Nombre de jours du $k^{\text{ième}}$ groupe dans la séquence réduite S_r	
Jg_{min}	Nombre de jours minimum du $k^{\text{ième}}$ groupe dans la séquence réduite S_r	
$J_{seq_{min}}$	Nombre de jours minimum dans chaque sous-séquence S_s	

$J_{sseq}(S_s)$	Nombre de jours de la sous-séquence S_s	
K	Nombre de groupes et de centres	
l_{suppr}	Durée de la séquence supprimée	jours
M	Matrice d'état	
N_{suppr_i}	Nombre de suppressions possibles de l'itération i	
p	Potentiel de la ressource à chaque instant	W
P	Potentiel annuel de la ressource	kWh/an
$Prof_{BS}$	Profondeur des brise-soleil verticaux pour chaque façade	m
r	Point de référence pour le calcul de l'hypervolume	
s_j	Séquence météorologique journalière retenue dans la séquence réduite S_r	
s_k	Séquence météorologique journalière correspondant au $k^{i\text{ème}}$ centre	
S	Jeu de sollicitations météorologiques sur une année utilisé pour la STD	
S_r	Séquence météorologique réduite finale	
S_{r_i}	Séquence météorologique obtenue à l'issue de l'itération $S_{r_{i-1}}$ du processus de construction de S_r	
S_s	Sous-séquence de la séquence réduite S_r	
t	Pas de temps	Indéfini
T	Température	
TL	Transmission lumineuse du vitrage	
$Type_w$	Type de vitrage	
U_w	Coefficient de déperdition thermique des vitrages	W/(m ² .K)
V	Nombre de valeurs dans la journée j	
x	Élément du jeu de données X	
\bar{x}_j	Moyenne des besoins énergétiques pour une journée j	W/h
\bar{x}_k	Moyenne journalière des besoins énergétiques pour le $k^{i\text{ème}}$ groupe	W/h
X	Jeu de données obtenu suite à une simulation annuelle utilisant le jeu de sollicitations S	
X_{suppr}	Ensemble des observables supprimés au cours d'une des coupes testées lors d'une itération du processus de construction de la période réduite	
Y	Vecteur de sorties	
$z_{j,k}$	Booléen indicateur de l'association d'une journée à un groupe	

Indices et exposants

air	Relatif à l'air extérieur
Ch	Chauffage
$conc$	Concomitant
exp	Exploitation ou exploité
ext	Extérieur
$Froid$	Refroidissement
int	Intérieur

j	Numéro de la journée, ou autrement dit du profil journalier
k	Indice du groupe
mur	Relatif aux murs des bâtiments neufs
n	Indice de la fonction objectif du problème d'optimisation
s	Ressource solaire
v	Indice de la valeur dans la journée j
$toit$	Relatif à la toiture des bâtiments neufs
tot	Total
*	Relatif aux calculs effectués sur la période de simulation réduite mais sans avoir évalué le bâtiment par STD sur cette séquence réduite
**	Relatif aux grandeurs obtenues par STD du modèle en utilisant la séquence réduite S_r au lieu de la séquence initiale S

Abréviations et autres notations

AGI	Algorithme Génétique Interactif
ACV	Analyse de Cycle de Vie
ANR	Agence Nationale de la Recherche
APD	Avant Projet Définitif
APS	Avant Projet Sommaire
BBC	Bâtiments Basse Consommation
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (Bâti et Informations Modélisés)
BN	Modèle des Bâtiments Neufs (Nantes, projet de densification urbaine)
BN_M	Modèle des Bâtiments Neufs avec Masques (idem)
BN_QE	Modèle des Bâtiments Neufs dans le Quartier Existant (idem)
BSP	BuildSysPro open source
CES	Centre Efficacité Energétique des Systèmes
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (mécanique des fluides numérique)
CHTC	<i>Convective Heat Transfer Coefficient</i> (coefficient de transfert de chaleur par convection)
CLO	De Courtes Longueurs d'Onde
CMA-ES/HDE	<i>Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy and Hybrid Differential Evolution algorithm</i>
CRENAU	Centre de Recherche Nantais Architectures Urbanités
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
DCE	Dossier de Consultation des Entreprises
DEAP	<i>Distributed Evolutionary Algorithms in Python</i>
DJU	Degrés Jour Unifiés
E+	EnergyPlus
ED	<i>Existing District</i> : modèle du quartier existant (Strasbourg, projet de densification urbaine)
EDF	Électricité de France

ENSAV	École Nationale Supérieure d'Architecture de Versailles
gbXML	<i>Green Building XML</i>
GLO	De Grandes Longueurs d'Onde
HDR	Habilitation à Diriger des Recherches
ICS	<i>Iso-solar Collection Surfaces</i>
INES	Institut National de l'Energie Solaire
IRS	<i>Iso-solar Rights Surfaces</i>
LOD	<i>Level Of Developpement</i>
ND	Niveau de développement
NSGA	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm</i> (algorithme génétique élitiste de tri non-dominé)
NSGA-II	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II</i>
MERUBBI	Méthode d'Exploitation des Ressources Utiles du Bâtiment Bioclimatique dans son Ilot
P	<i>Project</i> : modèle du bâtiment neuf du projet (Strasbourg, projet de densification urbaine)
PFM	Plateforme MERUBBI
PinED	<i>Project in Existing District</i> : modèle du nouveau bâtiment intégré dans le quartier existant (Strasbourg, projet de densification urbaine)
PRO	Étude de PROjet
PT_M	Outil de pré-traitement de la plateforme MERUBBI
PwS	<i>Project with Shadings</i> : modèle du nouveau bâtiment entouré des bâtiments existants représentés comme des masques solaires (Strasbourg, projet de densification urbaine)
P+C	Ensemble logiciel Pleiades+COMFIE
QE	Modèle du Quartier Existant (Nantes, projet de densification urbaine)
RT2012	Réglementation Thermique actuellement en vigueur en France pour la construction des bâtiments neufs
SCE	<i>Solar Collection Envelope</i> (Enveloppe pour l'exposition au Soleil)
SIG	Système d'Information Géographique
SRE	<i>Solar Right Envelope</i> (Enveloppe pour le droit solaire)
STD	Simulation Thermique Dynamique
UHA	<i>Urban Horizon Angle</i> (Angle d'obstruction)
VALERIE	VALorisation par l'Enveloppe du bâtiment des Ressources énergétiques Immédiatement Exploitable
ZAC	Zone d'Aménagement Concerté
3D	En trois dimensions

Introduction

Il est attendu que la part de population mondiale vivant dans des aires urbaines atteigne 66 % en 2050, contre 30 % en 1950 et 54 % en 2014 [1]. Cette urbanisation, fortement expansive [2], a des impacts néfastes sur l'environnement ainsi que sur la santé, la qualité de vie et la sécurité alimentaire des humains, notamment à travers la destruction de forêts, de zones humides et de terres agricoles [3]. L'évolution de la surface des terres agricoles en France illustre bien ce phénomène : elle est passée de 34.5 millions d'hectares en 1960 [4] à 28 millions d'hectares en 2014 [5].

La densification des zones urbaines existantes peut permettre de limiter cet étalement urbain. Néanmoins, venir combler les « dents creuses » présentes au sein des villes ou construire sur les toits risque d'accentuer l'effet d'îlot de chaleur urbain¹ déjà bien présent au sein des aires urbaines denses [7] et qui risque d'être aggravé par le changement climatique en cours [8]. Cela pose aussi des problèmes d'accessibilité des bâtiments voisins à la ressource solaire, en diminuant leurs possibilités d'exploitation de cette ressource pour combler leurs besoins de chauffage et d'éclairage. Pour ces bâtiments existants, le potentiel de production d'énergies renouvelables via des systèmes intégrés au bâti peut lui aussi être pénalisé [9].

Par conséquent, l'intégration d'un nouveau bâtiment dans un quartier doit se faire en prenant en compte les interactions entre les bâtiments existants et le nouvel édifice. Or, Rusaouën faisait en 2013 le constat suivant, qui nous semble toujours d'actualité : « Les processus actuels de conception en Génie Civil Bâtiment sont centrés sur la réalisation d'un bâtiment, dont l'intégration dans son environnement n'est que peu développée. Ceci est dû à l'absence d'outils génériques d'aide à la décision en matière d'aménagement urbain (qui ne soient en particulier pas captés par un acteur particulier au bénéfice d'une vision singulière et non partagée de l'espace urbain) »².

Il semble donc particulièrement utile de développer un outil pour assister les concepteurs de projets d'intégration d'un ou plusieurs bâtiment(s) dans un environnement urbain existant. Dans cette thèse, nous considérons que ces concepteurs sont des architectes et des techniciens de bureaux d'études. Des urbanistes et des politiques peuvent être intégrés dans le processus de conception mais ne seront pas, *a priori*, les utilisateurs directs d'un tel outil.

Dans ce contexte, dans la première partie du chapitre I de cette thèse nous présentons les méthodes d'optimisation multicritère existantes et expliquons en quoi ce sont des outils pertinents pour conseiller les concepteurs de bâtiments. Nous détaillons en particulier le fonctionnement de la méthode la plus populaire - l'algorithme génétique NSGA-II - pour l'application à la conception de bâtiment. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous montrons comment la prise en compte de

1. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain se traduit par des températures plus élevées en ville que dans les alentours. L'histoire de son identification est résumée par Musy et Bozonnet dans la partie 13.2.2.1 du livre de référence coordonné par Peuportier [6].

2. Page 170, Gilles Rusaouën dans l'ouvrage coordonné par Bruno Peuportier : *Livre blanc sur les recherches en énergétique du bâtiment*. Les Presses MINES ParisTech, 2013, 238 p.

2 | INTRODUCTION

l'environnement des bâtiments a évolué, depuis les débuts de l'architecture bioclimatique jusqu'à l'émergence récente d'outils d'optimisation à l'échelle urbaine.

Dans le chapitre II, nous faisons l'inventaire des caractéristiques qu'il nous semble pertinent qu'un outil d'aide à la conception de projets de densification urbaine possède. Après cela nous détaillons comment EnergyPlus (E+) et Pleiades+COMFIE (P+C), deux outils de Simulation Thermique Dynamique (STD) de bâtiments particulièrement populaires en France, se positionnent par rapport à ces exigences. La faisabilité du couplage entre l'un de ces outils et un algorithme génétique est présentée. Cette technique comporte certaines limites qui pourraient être dépassées par la plateforme en cours de développement dans le projet MERUBBI, dont nous expliquons la démarche à la fin de ce deuxième chapitre.

Le chapitre III débute par une description détaillée de la future plateforme MERUBBI (PFM). Nous présentons ensuite les résultats d'une étude comparative entre la PFM, E+ et P+C, basée sur l'évaluation énergétique d'un projet de densification d'un îlot à forte densité urbaine. L'idée est de déterminer lequel de ces trois outils est le plus pertinent pour estimer les conséquences de tels projets ainsi que la fiabilité de la plateforme par rapport à E+ et P+C, qui sont deux outils ayant fait l'objet de nombreuses validations.

Les enjeux liés au temps de calcul nécessaire pour chaque simulation et pour mener à bien une optimisation par algorithme génétique sont mentionnés à plusieurs reprises dans ce manuscrit. La première partie du chapitre IV présente donc des méthodes pour diminuer ce temps de calcul et nous y proposons une technique de réduction de la période utilisée pour les simulations. La deuxième partie de ce dernier chapitre est dans un premier temps dédiée à la présentation et l'analyse des résultats de la résolution de six problèmes de conception d'un bâtiment neuf dans un quartier existant, afin d'illustrer les capacités de la méthode d'optimisation développée. Dans un deuxième temps, nous formulons diverses propositions pour enrichir cette méthode.

Des prémices de l'architecture bioclimatique à l'optimisation énergétique à l'échelle du quartier

Table des matières

1	Introduction	4
2	Méthodes d'optimisation multicritère et application au domaine du bâtiment	4
2.1	Présentation générale des méthodes d'optimisation	4
2.2	Algorithmes évolutionnaires	5
2.3	Optimisation multiobjectif et aide à la décision	8
2.3.1	Méthodes agrégées	8
2.3.2	Méthodes non-agrégées	9
2.3.3	Méthodes interactives	11
2.4	Intérêt des algorithmes génétiques pour l'optimisation de bâtiments	11
2.5	Intérêt de l'algorithme génétique NSGA-II	12
3	Bioclimatisme : évolution des méthodes et échelles d'application	13
3.1	A l'échelle du bâtiment	13
3.1.1	Origines et évolution de la démarche	13
3.1.2	Applications modernes : exemples d'optimisations	15
3.2	A l'échelle du quartier	19
3.2.1	Evaluation du potentiel solaire	19
3.2.2	Utilisation d'outils de simulation thermique dynamique à l'échelle urbaine	22
3.2.3	Outils d'évaluation du microclimat urbain	25
3.2.4	Etudes d'impact du contexte urbain sur le bilan énergétique des bâtiments	26
3.3	Vers l'optimisation à l'échelle urbaine	28
4	Synthèse	32

1 Introduction

Certaines recherches présentées dans ce chapitre traitent de l'optimisation de l'utilisation du rayonnement solaire par des bâtiments en jouant sur les caractéristiques d'une de leurs façades, des bâtiments entiers voire de leur environnement urbain. Un accent particulier est mis sur l'optimisation multicritère (ou « multiobjectif ») car en énergétique du bâtiment les critères que l'on cherche à minimiser ou maximiser sont souvent multiples. Les algorithmes génétiques étant particulièrement adaptés à ce contexte et utilisés dans de nombreux exemples cités en deuxième partie, la première partie du chapitre porte sur leur description et leur positionnement au sein de l'éventail de méthodes d'optimisation existant. Cet exposé n'a pas pour ambition de dresser un état de l'art exhaustif de ces méthodes mais plutôt de donner une idée de la richesse de cet univers et de la place qu'y occupent les algorithmes génétiques.

La deuxième partie de ce chapitre donne un aperçu de l'évolution des travaux de recherche relatifs à l'optimisation de la conception des bâtiments. Nous y présentons tout d'abord des études portant sur l'amélioration de l'exploitation de l'énergie solaire par certaines parois de bâtiments, de façon pratique et théorique. Le passage à l'échelle du bâtiment entier est ensuite traité à travers des exemples d'optimisations numériques. La dernière partie du chapitre est dédiée aux travaux qui concernent plus particulièrement notre problématique, qui se place à l'échelle du quartier. Nous évoquons ainsi les premiers travaux d'évaluation du potentiel solaire dans un contexte urbain - c'est à dire la quantité de rayonnement solaire incident sur les surfaces des bâtiments étudiés - puis les outils numériques qui leur ont succédé et leurs applications. Ce chapitre s'achève sur les avancées récentes en termes d'optimisation à l'échelle du quartier.

2 Méthodes d'optimisation multicritère et application au domaine du bâtiment

2.1 Présentation générale des méthodes d'optimisation

Un problème d'optimisation est tout d'abord défini par l'espace de recherche de ses solutions, qui regroupe l'ensemble des domaines de définition des variables du problème. Une méthode d'optimisation vise à trouver dans cet espace la solution, ou l'ensemble de solutions, qui permet de satisfaire au mieux le ou les critère(s) du problème. Chaque critère peut être exprimé comme une fonction plus ou moins complexe des variables du problème. Le but de l'optimisation est alors de minimiser ou maximiser cette fonction qui peut être nommée de différentes façons, par exemple : « fonction objectif », « fonction coût », « critère d'optimisation », « critère de décision » ou « indicateur ». Il est possible d'ajouter au problème un ensemble de contraintes, c'est-à-dire des conditions sur l'espace de recherche que les variables doivent respecter.

Il existe plusieurs approches de classification des méthodes d'optimisation. Ainsi, on peut considérer une division en deux catégories : les méthodes locales et les méthodes globales [10]. Les premières ont pour but de trouver un optimum local de la fonction objectif, ce qui passe généralement par le calcul de sa dérivée. Les secondes se donnent pour objectif la convergence vers un optimum global de la fonction à optimiser. Ces méthodes globales utilisent parfois des programmes de recherche locale associés à des mécanismes permettant de ne pas se focaliser sur des optimaux locaux. Cependant, un grand nombre d'entre elles se basent sur d'autres techniques comme :

- les méthodes énumératives, qui consistent à passer en revue tout l'espace de recherche et nécessitent donc que sa taille soit restreinte ;
- l'exploration aléatoire de l'espace de recherche, qui peut être très coûteuse en temps de calcul ;
- les processus évolutionnaires, dans lesquels l'ensemble des solutions possibles évolue par étapes successives. Leur fonctionnement est décrit dans [la partie 2.2 de ce chapitre](#).

Il est aussi possible de répartir les méthodes d'optimisation en deux familles principales [11] : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

Les méthodes déterministes. Elles explorent l'espace de recherche de façon méthodique, ce qui les rend difficilement applicables à des problèmes de grande taille, pour lesquelles elles peinent à trouver un optimum global dans un temps raisonnable. On trouve parmi les méthodes d'optimisation déterministes des méthodes de recherche locale (par exemple les méthodes de gradient, la méthode *multistart* ou encore celle du simplexe) qui convergent vers l'optimum le plus proche de la solution courante en explorant son voisinage. Il existe aussi des méthodes de recherche globale, qui cette fois recherchent la convergence vers l'optimum global de la fonction objectif, comme l'algorithme de séparation – évaluation (*branch and bound*) ou la méthode du *tunneling*. Une présentation succincte de ces techniques est donnée dans la thèse de Berro [11].

Les méthodes stochastiques. Elles allient un processus de création aléatoire de points dans l'espace de recherche à l'utilisation d'une heuristique, technique qui permet de guider la convergence de l'algorithme vers des solutions proches de l'optimum. Elles regroupent notamment des méthodes s'appuyant sur des échantillonnages réalisés par la méthode de Monte-Carlo [12], le *branch and bound* stochastique [11] ainsi que les métaheuristiques, heuristiques conçues pour pouvoir être appliquées à de nombreux problèmes différents sans modification majeure. La famille des métaheuristiques regroupe des techniques comme le recuit simulé, la méthode de recherche avec tabous, les algorithmes de colonies de fourmis, les essaims particuliers ainsi que les algorithmes évolutionnaires, dont on trouvera des descriptions détaillées dans un ouvrage collectif dirigé par Siarry [13].

2.2 Algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires sont nés dans les années 1960-1970 sous différentes formes [11, 14, 15] : les algorithmes génétiques proposés par Holland [16] et rendus populaires par Goldberg [17], la programmation évolutionnaire [18] et les stratégies d'évolution [19]. Par la suite ces

travaux ont inspiré de nouvelles méthodes comme la programmation génétique [20] et les systèmes de classifieurs [17], mentionnés parmi les algorithmes évolutionnaires dans la thèse de Berro [11]. Certaines publications [21–23] placent dans cette même catégorie l'évolution différentielle [24], métaheuristique inspirée par les algorithmes génétiques et les stratégies d'évolution. Pour finir, l'état de l'art sur les méthodes informatiques évolutionnaires rédigé par Marsault dans le rapport final du projet ANR¹ « Eco Conception Générative » [23] indique (p. 55) que la famille des algorithmes évolutionnaires contient aussi les algorithmes à estimation de distribution [25].

Les algorithmes évolutionnaires sont inspirés de la théorie darwinienne de l'évolution naturelle des espèces [26] - selon laquelle dans une population d'individus les gènes ayant le plus de chances d'être transmis à la prochaine génération d'individus sont ceux qui favorisent la survie ou la reproduction - et de connaissances plus modernes en génétique. Ainsi, chaque solution potentielle du problème d'optimisation est appelée « individu » et un groupe d'individus est nommé « population ». Chaque individu est représenté par un ou plusieurs chromosome(s) constitué(s) de gènes qui définissent l'individu. Ces gènes sont les variables du problème posé, qui peuvent prendre différentes valeurs, que l'on pourrait appeler « allèles » pour poursuivre l'analogie avec le vocabulaire utilisé en génétique. Dans un algorithme évolutionnaire, la population d'individus est manipulée à chaque itération pour former différentes générations, au sens généalogique du terme. Les individus de la population courante sont nommés parents par rapport aux individus créés par reproduction des parents, qui sont nommés enfants.

A chaque itération la population évolue sous l'action de quatre opérations mimant les mécanismes qui interviennent dans l'évolution des espèces : la sélection pour la reproduction, la reproduction en elle-même, l'évaluation des performances et la sélection pour le remplacement.

Sélection pour la reproduction : λ parents sont choisis dans la population courante de μ individus sur la base de leurs performances vis-à-vis des objectifs de l'optimisation. La population initiale étant générée aléatoirement, il faut évaluer les performances de chacun de ses individus avant la phase de sélection de la première itération.

Reproduction : cette phase repose sur l'application de deux opérateurs de variation sur les chromosomes des λ parents sélectionnés pour donner naissance à λ enfants. Un opérateur de croisement permet de créer deux enfants (par exemple E1 et E2) en mélangeant aléatoirement des segments des chromosomes de deux parents (P1 et P2), comme le montre la [figure I.1](#) pour un problème d'optimisation de la forme d'un quartier par rapport au rayonnement solaire [15]. Un opérateur de mutation vient ensuite modifier les allèles de certains gènes de certains individus de la nouvelle population. Ceci permet d'apporter de la diversité dans la population pour améliorer l'exploration de l'espace de recherche des solutions. Les opérations de croisement et de mutation ne sont pas systématiques, elles ont chacune une certaine probabilité de se produire et ces deux probabilités sont des paramètres de l'algorithme. La probabilité de mutation ne doit pas être trop élevée afin d'éviter de transformer le processus en recherche aléatoire.

1. Agence Nationale de la Recherche.

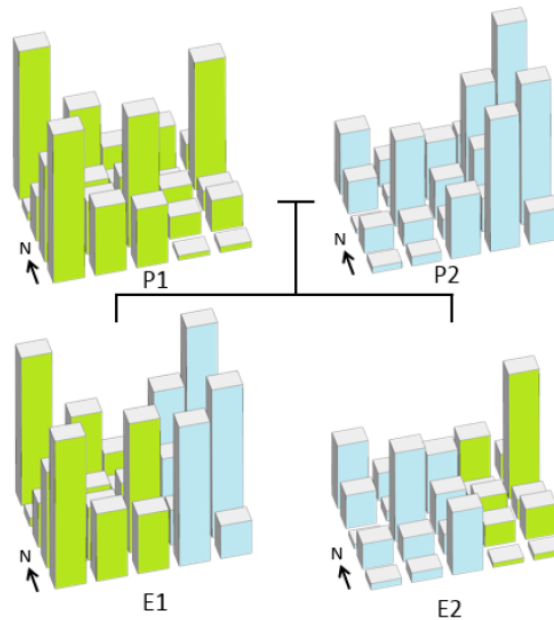


Figure I.1 – Illustration du croisement de deux quartiers selon des bandes nord-sud - tirée de Vermeulen, 2014 [15].

Evaluation : il s'agit ici d'évaluer les performances des λ enfants créés par rapport aux critères du problème posé. Cette étape est souvent la plus coûteuse en temps de calcul, en particulier lorsque l'évaluation des individus nécessite la simulation d'un modèle complexe.

Sélection pour le remplacement : afin de maintenir une population de taille constante au fil des générations, μ individus sont sélectionnés (une ou plusieurs fois) parmi les λ enfants créés, et parfois aussi parmi les μ individus de la population courante. Le choix des individus se fait en fonction de leurs performances au regard des critères de l'optimisation. Le groupe issu de cette élection constitue la population courante de la génération suivante.

Le processus d'optimisation prend fin lorsque le critère d'arrêt est atteint, ce qui prend généralement la forme d'un nombre de générations maximum ou d'un pourcentage minimum d'évolution de la performance des individus d'une génération à l'autre. La figure I.2 présente le fonctionnement d'un algorithme évolutionnaire, avec pour illustrations des graphiques présentant les populations obtenues à différents stades du processus pour un problème de minimisation de deux fonctions objectifs. L'arrêt du processus est imposé à l'issue de la soixante-dixième génération.

Dans cet exemple, les μ individus sélectionnés pour former la population de la génération suivante sont choisis parmi un ensemble constitué des μ individus de la population courante et des λ enfants créés à partir des parents sélectionnés pour la reproduction. Etant donné que les opérations de croisement et de mutation peuvent donner naissance à un enfant moins performant que ses parents, cette technique permet de ne pas perdre de bons individus au cours du processus. On dit dans ce cas que la méthode d'optimisation est élitiste, c'est-à-dire qu'au moins une partie des individus les plus performants est conservée d'une génération à l'autre, qu'ils aient été engendrés à la génération précédente ou non.

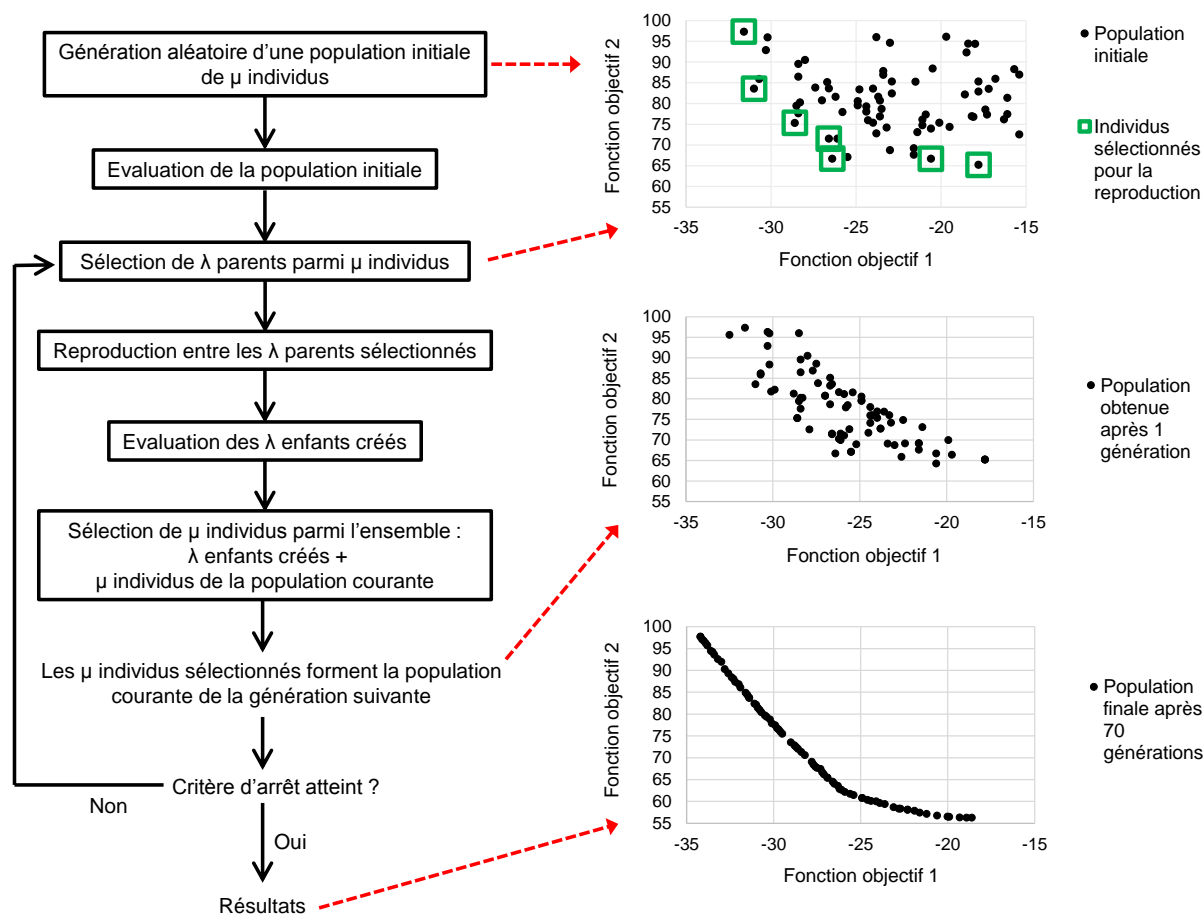


Figure I.2 – Schéma de principe d'un algorithme évolutionnaire.

2.3 Optimisation multiobjectif et aide à la décision

Les méthodes d'optimisation permettant de résoudre des problèmes multicritères sont souvent utilisées dans une optique d'aide à la décision. Les décisions prises au final sont des compromis entre les objectifs exprimés de façon mathématique, utilisés comme critères d'optimisation par la méthode, et les choix spécifiques du décideur qui peuvent être difficiles à formaliser. On peut classer les méthodes d'optimisation selon la façon dont ces compromis sont réalisés [27].

2.3.1 Méthodes agrégées

Les méthodes agrégées reposent sur une combinaison des fonctions objectives en une seule fonction. On peut alors appliquer une technique d'optimisation monocritère au nouveau problème posé. La définition des paramètres d'entrée de ces méthodes nécessite de bonnes connaissances du problème pour transformer un problème multicritère en un problème monocritère. Il s'agit de réussir à exprimer tous les objectifs avec la même unité, ce qui est particulièrement complexe lorsqu'on est confronté à un mélange de critères qualitatifs et quantitatifs. Du point de vue du décideur, on parle de méthodes *a priori* car on sollicite son avis en amont pour savoir quel poids attribuer à chaque objectif. Parmi les méthodes agrégées, on trouve des techniques comme la moyenne pondérée, le

goal programming, le min-max, le *goal attainment* ou encore la méthode ϵ -contrainte, décrites dans la thèse de Berro [11] (pp. 34-38).

2.3.2 Méthodes non-agrégées

À l'inverse des méthodes *a priori*, les méthodes non-agrégées peuvent être qualifiées de méthodes *a posteriori* du point de vue du décideur, car elles aboutissent à un ensemble de solutions quasi optimales parmi lesquelles il doit faire son choix. Il existe de nombreuses méthodes non-agrégées, divisées en deux groupes : celles qui sont basées sur la dominance au sens de Pareto, et celles qui ne le sont pas.

Méthodes non-agrégées et non-Pareto. L'algorithme VEGA, l'utilisation des genres et la méthode lexicographique, sont des exemples de méthodes non-agrégées et non-Pareto [11]. Elles se distinguent en général par leur processus de recherche de solutions, qui traite chaque objectif indépendamment des autres.

Méthodes fondées sur la dominance au sens de Pareto. En optimisation multicritère, il est nécessaire de définir des règles pour déterminer si une solution est meilleure qu'une autre vis-à-vis des objectifs fixés. Ces relations entre les solutions d'un problème multicritère s'appellent des relations de dominance. La plus célèbre d'entre elles est la dominance au sens de Pareto, formulée en 1896 par Pareto [28]. En travaillant sur les notions d'équilibre économique et d'équilibre social, il a notamment montré qu'il existe des problèmes multicritères dans lesquels, à partir d'un certain optimum, il n'est plus possible d'améliorer la situation d'un individu sans dégrader celle d'un autre individu. Une solution correspondant à un tel optimum est dite Pareto-optimale, ou non dominée. On dit qu'une solution A domine une solution B au sens de Pareto si A est au moins aussi performante que B pour tous les critères du problème et si A est meilleure que B pour au moins un de ces critères.

Ainsi, dans l'exemple d'un problème de minimisation de deux fonctions objectifs f_1 et f_2 illustré par la [figure I.3](#), les points 1, 3 et 5 sont non-dominés. En effet, on ne peut pas dire que le point 3 domine le point 1 au sens de Pareto, car le point 3 est meilleur que le point 1 par rapport au critère de minimisation de f_2 , mais moins bon que ce dernier par rapport au critère de minimisation de f_1 . En revanche, le point 4 est dominé par les points 3 et 5 qui ont de meilleures performances que lui vis-à-vis des deux objectifs du problème.

L'ensemble des solutions non dominées de l'espace de recherche est appelé « front de Pareto ». On le nomme aussi « surface de compromis », car il permet de présenter au décideur différents compromis tous aussi bons les uns que les autres au sens de Pareto. Dans le cas de problèmes d'optimisation à deux objectifs, la présentation des résultats sous la forme de fronts de Pareto est particulièrement commode car on peut dessiner ces fronts dans un graphique en deux dimensions. Comme le montre la [figure I.4](#), pour un ensemble de solutions donné on peut présenter différents fronts de Pareto [29]. Sur le graphique a), on sépare les solutions en deux groupes : celles qui sont dominées par au moins une solution (comme la solution B qui est notamment dominée par la solution A) et celles qui ne sont dominées par aucune solution, et qui forment donc un front de Pareto. Sur le graphique b), les solutions qu'aucune autre ne

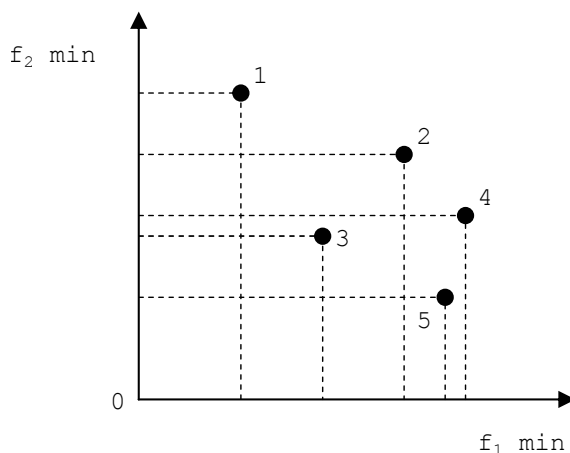


Figure I.3 – Exemple de relation de dominance au sens de Pareto - tiré de Berro, 2001 [11].

domine forment le front de Pareto de rang 1. On cherche ensuite dans l'ensemble des solutions restantes celles qui sont non-dominées, qui forment le front de Pareto de rang 2, et ainsi de suite.

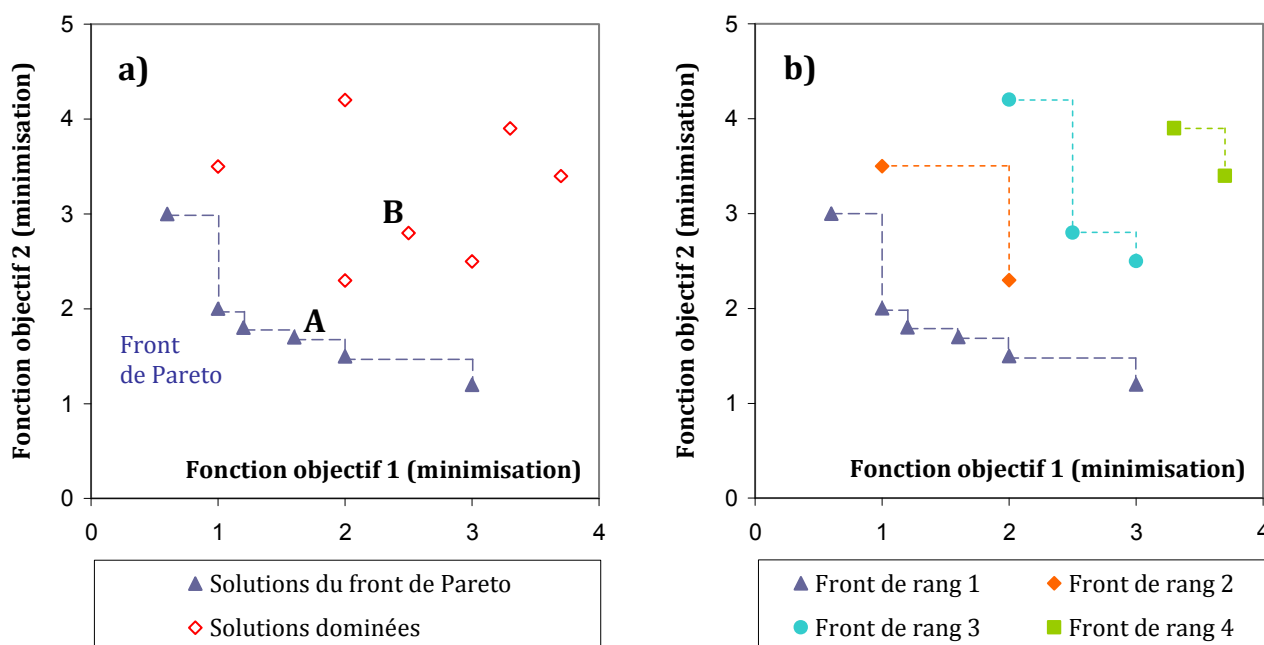


Figure I.4 – Fronts de Pareto pour un problème de minimisation de deux critères - tirés de Rivallain, 2013 [29].

Ces idées d'utilisation de la dominance au sens de Pareto viennent d'une proposition de Goldberg [17], comme technique de résolution de problèmes formulés par Schaffer [30]. Les méthodes d'optimisation utilisant cette relation de dominance trouvées dans la littérature sont toutes basées sur des algorithmes évolutionnaires. Certaines d'entre elles sont élitistes, comme les méthodes SPEA, PAES, PESA, NSGA-II et PESA-II, tandis que les méthodes MOGA, NSGA et NPGA ne le sont pas [11]. L'algorithme utilisé pour obtenir les résultats qui illustrent la figure I.2 est NSGA-II, dans cet exemple la sélection se fait donc en utilisant la dominance au sens de Pareto, et la méthode est élitiste.

2.3.3 Méthodes interactives

Il existe aussi des méthodes interactives, qui permettent au concepteur du projet d'exprimer ses préférences au cours du processus d'optimisation, ce qui exige de sa part une certaine connaissance du fonctionnement de l'outil. Il ne s'agit pas de méthodes agrégées, mais elles forment une branche particulière des méthodes non-agrégées, puisqu'il faut introduire une prise en compte de l'avis de l'utilisateur sur des solutions intermédiaires. L'ouvrage de Bouyssou *et al.* [31] décrit plus précisément ces méthodes (pp. 233-242), que l'on peut aussi qualifier d'approches de résolution basées sur des préférences progressives, où des phases de calcul et d'information se succèdent jusqu'à la satisfaction de l'utilisateur. La partie 3.4.2 du chapitre IV de cette thèse présente en détail l'une de ces méthodes d'optimisation interactives : les algorithmes génétiques interactifs.

2.4 Intérêt des algorithmes génétiques pour l'optimisation de bâtiments

Les algorithmes génétiques ont été largement utilisés dans des problèmes d'optimisation de la conception de bâtiments [32, 33], du dimensionnement de systèmes de chauffage et de ventilation [34, 35] voire de systèmes de production d'énergie renouvelable intégrés aux bâtiments [36]. Plus spécifiquement, parmi les techniques d'optimisation de stratégies de conception bioclimatique, il semble que les algorithmes génétiques soient les plus répandus [37].

En 2008, un état de l'art des techniques d'optimisation utilisées en ingénierie de la conception a désigné le recours aux algorithmes génétiques comme étant la plus populaire d'entre elles [38]. En 2010 Evins [39] a affirmé que, parmi les 25 méthodes d'optimisation listées dans ces travaux, les mécanismes informatiques évolutionnaires étaient les seuls à être adaptés à toutes les caractéristiques des problèmes d'optimisation de la conception de bâtiments, à savoir :

- la difficulté de formaliser tous les objectifs du problème en fonctions objectifs,
- le grand nombre de variables du problème,
- le grand nombre de non-linéarités et d'inter-dépendances au sein du problème.

Il indique aussi que ces problèmes sont souvent multicritères, multimodaux (volonté d'obtenir plusieurs solutions au lieu d'une solution unique) et fortement contraints. Dans un état de l'art réalisé en 2013 [40], Evins a répertorié 74 travaux traitant de ces problèmes, dont 46 utilisent un algorithme génétique. Nguyen *et al.* ont renchéri en 2014 [32] en considérant le recours aux algorithmes génétiques comme étant la stratégie d'optimisation la plus utilisée pour l'analyse des performances des bâtiments.

Ce succès peut s'expliquer par le fait que les algorithmes génétiques sont des techniques d'optimisation distribuées, où les solutions sont construites en traitant simultanément toute une population de solutions et non une seule solution à la fois comme c'est le cas pour les métaheuristiques de voisinage (parmi lesquelles on trouve par exemple le recuit simulé et la recherche tabou). Ceci permet de présenter au décideur un échantillon représentatif de la diversité des solutions de valeurs équivalentes afin qu'il choisisse quel individu lui semble le meilleur, ou qu'il décide de s'inspirer de plusieurs solutions pour prendre les décisions finales.

De plus, en conception de bâtiments neufs, atteindre un certain niveau de performance sur un critère (par exemple la minimisation des consommations énergétiques) implique souvent de pénaliser la qualité du projet vis-à-vis d'un autre critère (par exemple le coût de construction du bâtiment). A partir de ce constat, des travaux comme ceux de Gero *et al.* [41] ont montré dès le début des années 1980 l'intérêt de l'optimisation multicritère et de la description de surfaces de compromis pour soumettre aux décideurs un panel de bonnes solutions et mieux comprendre les liens entre les critères de décision. On entre alors dans le domaine de l'aide à la décision qui réunit deux acteurs : le décideur et l'homme d'études [42]. L'optimisation par algorithme génétique est justement une méthode approchée, ce qui signifie que contrairement aux méthodes exactes, le résultat n'est pas une solution optimale mais un ensemble de bonnes solutions, obtenu après un nombre d'itérations que l'on peut fixer.

2.5 Intérêt de l'algorithme génétique NSGA-II

Parmi les algorithmes génétiques, la méthode d'optimisation la plus communément adoptée [36] pour résoudre des problèmes multiobjectifs est l'algorithme génétique élitiste de tri non-dominé NSGA-II, abréviation de *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II* et présenté en 2002 par Deb *et al.* [43]. Evins [40] ainsi que Nguyen *et al.* [32] ont cité dans leurs travaux de nombreuses études utilisant cet algorithme. NSGA-II est une version améliorée de la méthode NSGA, proposée en 1994 [44] suite à une suggestion de Goldberg [17].

Les deux algorithmes exploitent la relation de dominance de Pareto pour classer les solutions avant la phase de sélection : les solutions non-dominées obtiennent le premier rang, les solutions dominées uniquement par celles du premier rang obtiennent le second rang, etc. La sélection se fait ensuite sur la base de ce classement, les solutions ayant le plus faible rang ont d'avantages de chances d'être choisies.

Contrairement à NSGA, NSGA-II est élitiste. Comme certaines études comparatives [45] l'ont montré, l'élitisme permet généralement d'améliorer significativement la vitesse de convergence des algorithmes génétiques vers le front de Pareto optimal. Cette stratégie peut cependant entraîner une perte de diversité génétique des individus, problème que NSGA-II pallie en utilisant le critère de distance de peuplement [35, 46], plus connu sous le nom de *crowding distance*. Il s'agit d'une mesure de la distance entre une solution et ses voisines sur un front de Pareto. Le Riche *et al.* [46] (p. 10) décrivent le calcul de la distance de peuplement de la façon suivante :

- pour chaque objectif f_n on ordonne la population par valeurs croissantes de l'objectif,
- pour chaque individu i , on définit d_i^n , distance de peuplement partielle selon l'objectif f_n comme la somme des distances de i à ses deux plus proches voisins dans la liste ordonnée,
- la distance de peuplement totale d_i de l'individu i est donnée par la somme, sur l'ensemble des objectifs, des distances partielles.

La [figure I.5](#) illustre ce que représente la distance de peuplement d'une solution i d'un problème de minimisation à deux objectifs.

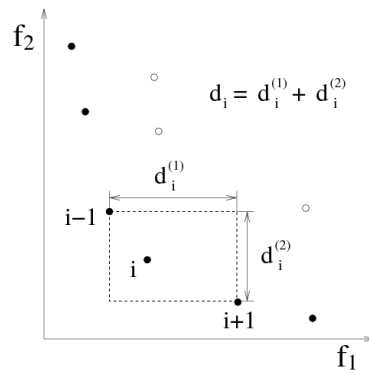


Figure I.5 – Illustration du calcul de la distance de peuplement - tirée de Le Riche et al., 2015 [46].

Lors de la phase de sélection, l'algorithme commence par sélectionner les solutions ayant le plus petit rang. Si cela ne suffit pas pour atteindre la taille de la population souhaitée pour la génération suivante, la sélection est complétée par les solutions de rang supérieur qui ont les plus grandes distances de peuplement. Ainsi, élitisme et distance de peuplement permettent à l'algorithme NSGA-II d'aboutir à des solutions de bonne qualité tout en explorant largement l'espace de recherche.

3 Bioclimatisme : évolution des méthodes et échelles d'application △

3.1 A l'échelle du bâtiment

3.1.1 Origines et évolution de la démarche

Dès les années 1900 on voit émerger une approche « bioclimatique » de l'architecture, qui repose sur la bonne intégration du bâtiment dans son environnement et sur l'utilisation des ressources énergétiques qui s'y trouvent. Comme le montre le chapitre 6 du mémoire de HDR² de Duforestel [47], ces dernières constituent un important gisement de performance énergétique pour le bâtiment, qui est aujourd'hui encore sous-exploité. Si une attention particulière est portée sur l'utilisation du soleil, on parle plus spécifiquement d'« architecture solaire » [10]. Franck Lloyd Wright, précurseur dans le domaine, a fait construire entre 1944 et 1948 la Jacobs House II avec son fameux hémicycle solaire. C'est l'un des premiers habitats solaires à avoir vu le jour. Les parois du bâtiment participent à la régulation du confort intérieur des occupants : la façade sud, entièrement vitrée, permet l'utilisation du soleil pour réchauffer le bâtiment en hiver et est surmontée d'une avancée de toiture pour éviter les surchauffes estivales tandis que l'inertie de la façade nord, en pierre et en grande partie enterrée, assure la stabilité thermique du logement. La figure I.6 montre des photographies de ces deux façades, issues du livre écrit par le couple Jacobs, propriétaire de la maison [48].

Cette combinaison d'un capteur d'énergie solaire et d'un accumulateur capable de restituer l'énergie avec un déphasage a été utilisée pour développer de nombreux systèmes dont le mur Trombe, aussi appelé mur Trombe-Michel [14]. Inventé et breveté par Morse en 1881, le concept de

2. Mémoire pour obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches.

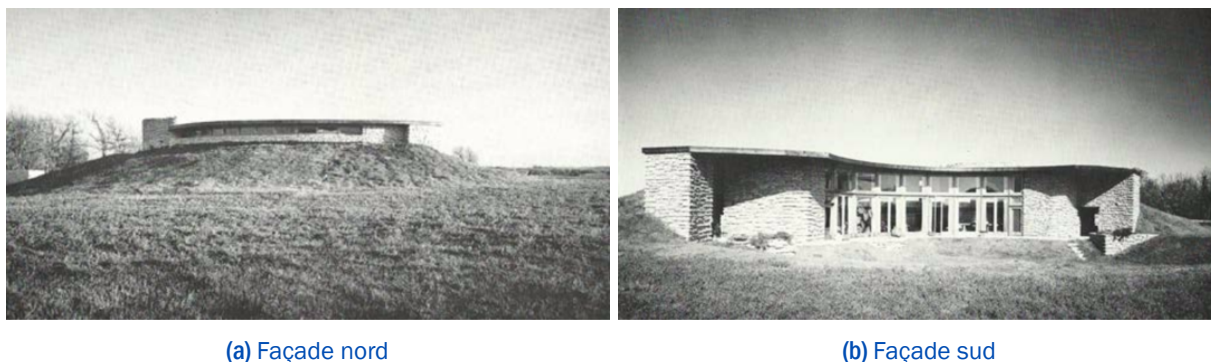


Figure I.6 – Photographies des façades nord et sud de la maison Jacobs II - tirées de Jacobs, 1978 [48].

ce mur a été concrétisé et popularisé par Michel et Trombe dans les années 1960 [49]. Il s'agit d'un vitrage placé devant la face extérieure d'un mur capteur créant ainsi une lame d'air, ventilée grâce à une entrée d'air en bas du mur et une bouche de soufflage en haut (voir figure I.7). Sur cette base, différents types de murs Trombe - à eau, avec des matériaux à changement de phase, etc - ont été développés [50], ainsi que d'autres types de façades double-peau [51] qui permettent de diminuer les besoins de chauffage des bâtiments qui en sont équipés.

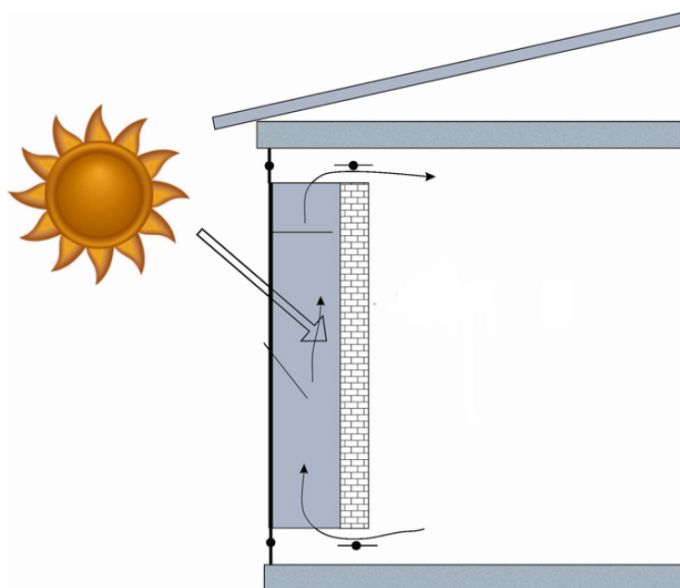


Figure I.7 – Schéma simplifié d'un mur Trombe - d'après Saadatian et al., 2012 [50].

Certaines technologies de parois dites « solaires », qui engendrent effectivement une diminution des besoins de chauffage, dégradent en fait l'impact total du soleil sur le bâtiment en augmentant considérablement les besoins de rafraîchissement. Par ailleurs, l'intérêt de l'approche bioclimatique étant d'améliorer l'exploitation des ressources de l'environnement (ici, le soleil) par le bâtiment, il est intéressant d'évaluer la qualité des technologies bioclimatiques par d'autres indicateurs que l'influence sur les besoins de chauffage. Ces observations ont été faites dans le cadre du projet VALERIE [52]. Elles ont notamment conduit au développement de trois indicateurs de performance bioclimatique [53] :

- le taux de couverture des besoins énergétiques du bâtiment par la ressource,
- le taux d'exploitation de la ressource par le bâtiment,
- le taux de génération de besoins supplémentaires par la ressource.

Cette approche est détaillée dans la [partie 4.1 du chapitre II](#). Avant la création du projet VALERIE, Tittlein [54] avait défini la notion d'efficacité solaire d'un bâtiment, qui correspond à « la part du flux solaire atteignant le bâtiment qui est valorisée pendant une période donnée »³ Elle est faite de deux composantes :

- l'efficacité solaire passive, qui caractérise les apports solaires utilisés pour limiter les besoins de chauffage et d'éclairage du bâtiment,
- l'efficacité solaire active, qui caractérise l'utilisation du flux solaire par des systèmes actifs comme un panneau solaire thermique ou un module photovoltaïque.

3.1.2 Applications modernes : exemples d'optimisations

3.1.2. i) Disposition et dimensionnement des protections solaires et des vitrages

Comme nous venons de le voir, il est possible de modifier la façon dont les parois des bâtiments exploitent le rayonnement solaire afin de diminuer les besoins de chauffage du bâtiment, mais il faut veiller à ce que le gain énergétique obtenu ne soit pas contre-balançé par l'augmentation des besoins de rafraîchissement. De plus, l'éclairement naturel des pièces d'un bâtiment par le soleil contribue au confort visuel de ses occupants et permet de diminuer les consommations d'énergie liées à l'éclairage artificiel. Des recherches ont été menées pour optimiser les caractéristiques de certaines façades de bâtiments vis-à-vis de ces critères.

Par exemple, la géométrie de la protection solaire extérieure de la façade sud d'un bureau a été optimisée pour minimiser ses besoins énergétiques, c'est-à-dire ses besoins de chauffage, de refroidissement et d'éclairage artificiel [55]. Les travaux ont été réalisés avec des techniques d'optimisation génétique à travers la plateforme d'optimisation multiobjectif modeFRONTIER. Avec une autre approche, Houpert a présenté dans sa thèse [56] un état de l'art des outils de dimensionnement des protections solaires par méthode inverse, comme les logiciels américains *Shading Analyser* et *Shading Mask* développés dans les années 1990. Cette méthode vise à déterminer les caractéristiques architecturales (dimensionnement d'une protection solaire, d'une ouverture, etc) optimales pour obtenir des valeurs d'ensoleillement données.

En 2014 l'algorithme NSGA-II a été utilisé pour optimiser la disposition de fenêtres sur la façade sud de l'atrium d'un bâtiment commercial de trois étages [57]. Il s'agissait de minimiser deux fonctions objectifs. La première représente les besoins énergétiques du bâtiment tels que décrits ci-dessus. La seconde est le coût de construction de la façade. Cette dernière est divisée en cellules rectangulaires. Les variables du problème d'optimisation sont l'absence ou la présence de fenêtre

3. Page 142, Pierre Tittlein : *Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation*. Thèse de doctorat, Génie Civil et Sciences de l'Habitat. Le Bourget-du-Lac : Université de Savoie, 2008.

sur chaque cellule, et dans le deuxième cas, l'absence ou la présence d'une casquette au-dessus de la fenêtre. La figure I.8 donne un aperçu des résultats de cette étude, présentés sous la forme d'un front de Pareto avec une illustration des deux solutions les plus extrêmes (coût minimum et besoins énergétiques minimums) et d'une solution intermédiaire.

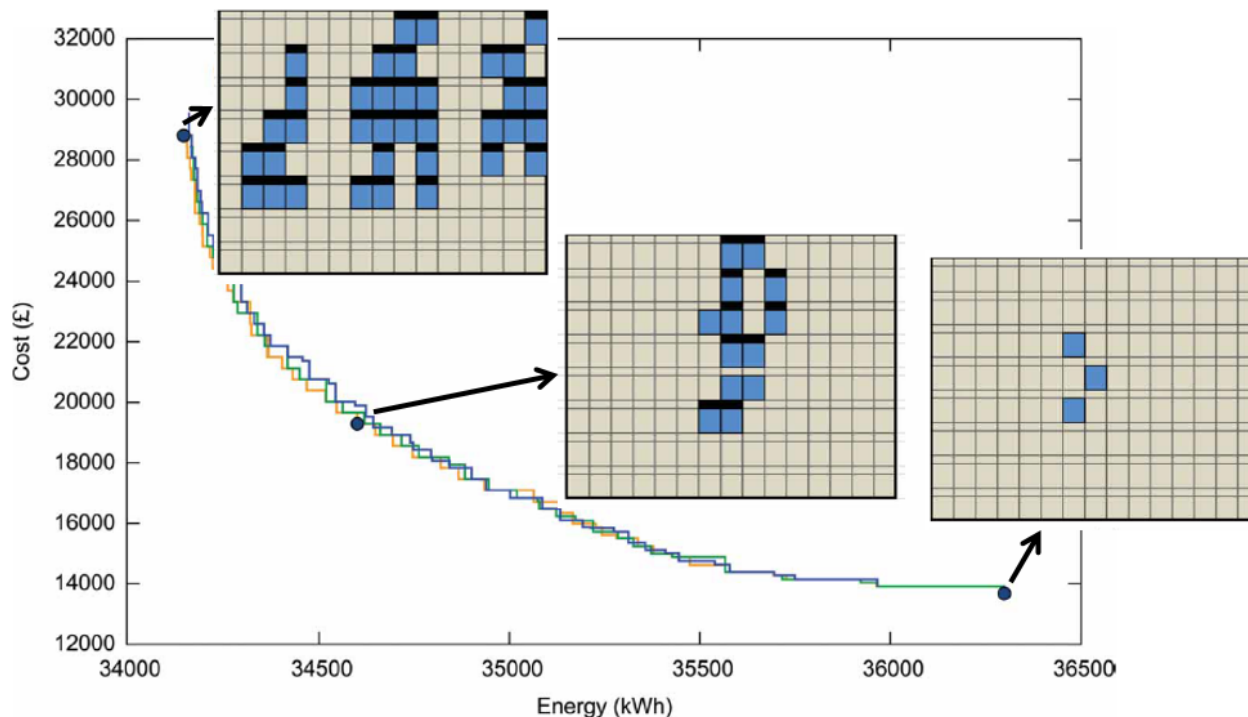


Figure I.8 – Optimisation de la disposition de fenêtres sur une façade - d'après Wright et al., 2014 [57].

Des travaux similaires avaient été réalisés précédemment pour optimiser le dimensionnement de fenêtres sur les quatre façades d'un immeuble de bureau avec un algorithme génétique, mais il s'agissait d'une optimisation monocritère pour laquelle seule la minimisation des besoins énergétiques était visée [58].

Une autre application de l'algorithme NSGA-II concerne cette fois les enveloppes de bâtiment capables de s'adapter aux conditions climatiques et aux exigences de confort des occupants [59]. Ainsi, six caractéristiques (densité et conductivité thermique de la paroi opaque, pourcentage de surface vitrée et type de vitrage, etc) de la façade sud d'un bureau ont été optimisées pour minimiser la consommation d'énergie primaire de la pièce (due au chauffage et à l'éclairage artificiel) ainsi que le nombre d'heures de surchauffe enregistrées dans ce local non climatisé. L'optimisation a été réalisée pour chacun des douze mois de l'année, ce qui a permis d'obtenir les solutions les plus adaptées à chaque saison.

3.1.2. ii) Morphologie

Certains travaux portent sur l'optimisation de la forme de la toiture d'un bâtiment. Ainsi, Rakha et Nassar [60] ont utilisé un algorithme génétique pour déterminer les morphologies de plafond permettant d'obtenir le meilleur éclairage naturel dans une grande pièce rectangulaire. Turrin *et*

al. [61] se sont intéressés à l'énergie solaire de façon plus large en montrant comment la méthode ParaGEN – qui intègre entre autres des algorithmes génétiques – peut être utilisée pour maximiser les gains solaires et la transmission de la lumière naturelle par une grande toiture, en jouant sur la forme de cette dernière. Cet outil peut traiter des toitures à la morphologie particulièrement complexe, comme celle présentée sur la [figure I.9](#).

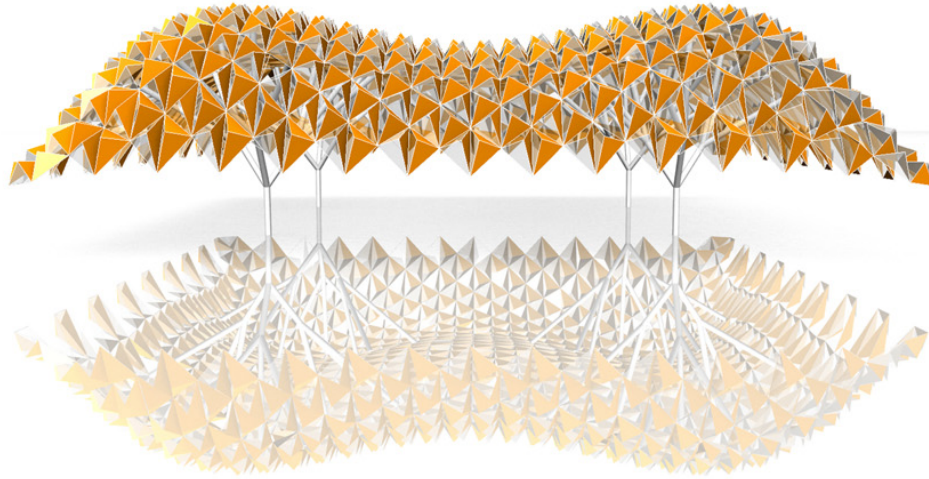


Figure I.9 – Exemple de modèle de toiture traité par la méthode ParaGEN - tiré de Turrin et al., 2011 [61].

De nombreuses publications traitent de l'optimisation de la morphologie d'un bâtiment entier. Cette dernière a en effet une forte influence sur la façon dont le bâtiment profite du rayonnement solaire et sur les pertes de chaleur par ses parois, donc sur son bilan énergétique.

Ainsi, des études ont été réalisées pour déterminer les dimensions optimales de l'enveloppe d'un bâtiment avec pour objectifs la minimisation de son coût de construction et de sa consommation annuelle de chauffage [62, 63]. Par ailleurs, Yi et Malkawi [64] ont utilisé un algorithme génétique pour trouver la forme de bâtiment qui permet d'obtenir la plus faible consommation énergétique annuelle. Comme le montre la [figure I.10](#), en été la concavité de certaines surfaces du bâtiment optimisé permet d'augmenter le pourcentage de parois ombragées. Cet avantage ne provoque pas d'augmentation des besoins de chauffage, car les creux ainsi formés ne sont pas assez profonds pour accentuer les ombres portées sur les parois en hiver.

D'autres travaux, dont les fonctions objectifs sont similaires, ne se focalisent pas uniquement sur la forme du bâtiment et considèrent de plus nombreuses variables dans le processus d'optimisation. Ainsi, l'optimisation par algorithme génétique menée par Tuhus-Dubrow et Krarti [65] sur des bâtiments résidentiels prend comme paramètres leur forme (parmi 7 géométries) mais aussi - entre autres - l'isolation des murs, de la toiture et des fondations, la surface des vitrages et leur type. Brownlee et Wright [66] ont utilisé l'algorithme NSGA-II en s'intéressant à l'orientation du bâtiment, aux matériaux qui le constituent ainsi qu'aux systèmes de ventilation, chauffage et refroidissement. Znouda *et al.* [67], qui ont travaillé sur des bâtiments méditerranéens, n'ont fait varier que leur longueur mais en permettant aussi aux algorithmes génétiques utilisés de considérer différents types et pourcentages de surface vitrée sur chaque façade ainsi que différents niveaux de protection solaire

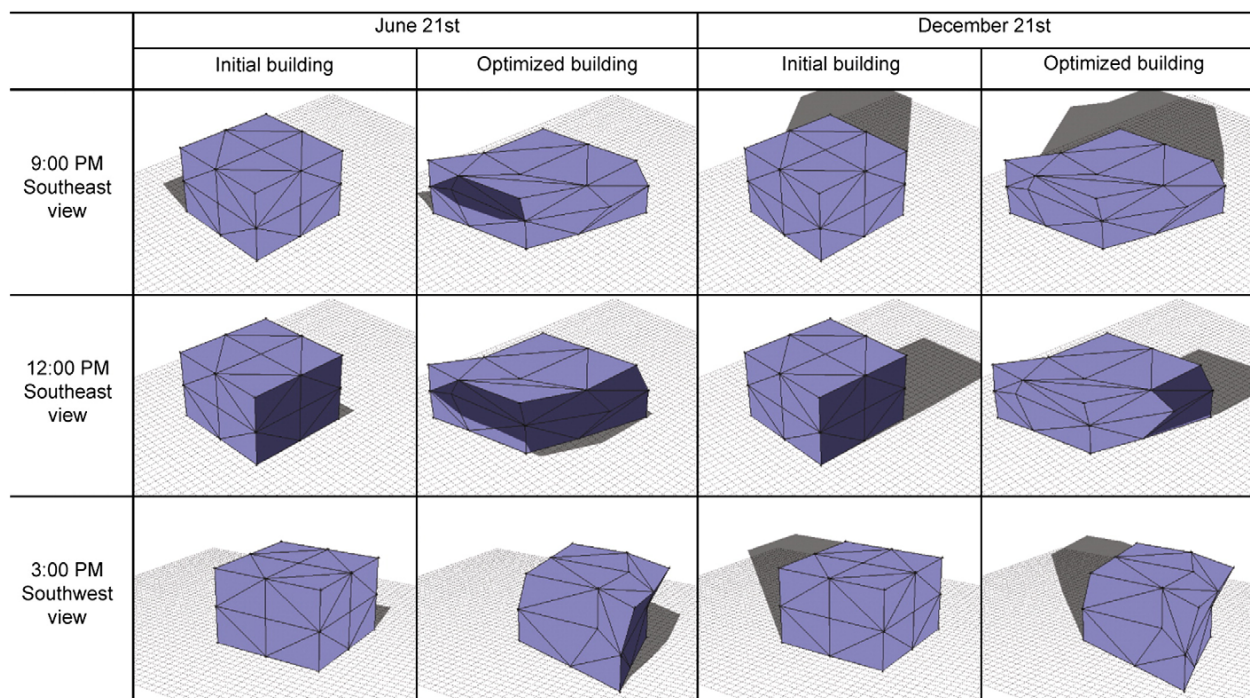


Figure I.10 – Comparaison entre le bâtiment avant et après optimisation, en été et en hiver - tirée de Yi et Malkawi, 2009 [64].

et d'isolation de la toiture. Des auteurs ayant pris en compte d'autres critères d'optimisation – comme le taux de CO₂ dans les pièces de vie - dans leurs travaux, en modifiant ou non la morphologie du bâtiment, sont mentionnés dans l'état de l'art établi en 2014 par Machairas *et al.* [33].

Chesné [10] a présenté dans ses travaux de thèse une approche innovante d'optimisation par algorithme génétique de la conception d'un bâtiment simplifié. Cette fois-ci, sa morphologie a été fixée : il s'agit d'un parallélépipède rectangle aux dimensions des maisons de la plateforme INCAS de l'Institut National de l'Energie Solaire. En plus de l'objectif classique de minimisation des besoins de chauffage, un critère de conception bioclimatique a été ajouté : la maximisation du potentiel solaire exploité. Cette grandeur caractéristique de l'exploitation du potentiel énergétique de la ressource solaire entre dans le calcul des trois indicateurs de performance bioclimatique mentionnés dans la partie 3.1.1 de ce chapitre. Les variables sélectionnées initialement pour l'optimisation étaient au nombre de 89, elles ont été réduites à une trentaine grâce à une analyse de sensibilité. Ces paramètres sont liés à la ventilation et à la composition de l'enveloppe. L'optimisation menée dans cette étude n'est pas à proprement parler multicritère, mais les valeurs optimales des paramètres obtenues dans les deux cas sont analysées pour déterminer quelles sont les configurations permettant de satisfaire au mieux les deux objectifs simultanément. Le bâtiment étudié a été considéré comme étant sur un site complètement dégagé, sans aucun masque proche ou lointain.

3.2 A l'échelle du quartier

3.2.1 Evaluation du potentiel solaire

Avant d'envisager l'optimisation du potentiel solaire d'un quartier, il faut prendre conscience de l'influence que l'environnement urbain d'un bâtiment peut avoir sur la quantité d'énergie solaire reçue par ce dernier. L'impact du contexte urbain sur le rayonnement solaire reçu par un bâtiment a tout d'abord été pris en compte en considérant un angle d'obstruction moyen, c'est à dire l'« angle que forme l'horizon avec le contexte urbain »⁴. Baker *et al.* [68] ont utilisé cette notion dans leur méthode LT (pour *Lighting and Thermal energy*) qui vise à établir le bilan thermique d'un bâtiment. La figure I.11 montre une représentation de cet angle d'obstruction, ici nommé UHA pour *Urban Horizon Angle*.

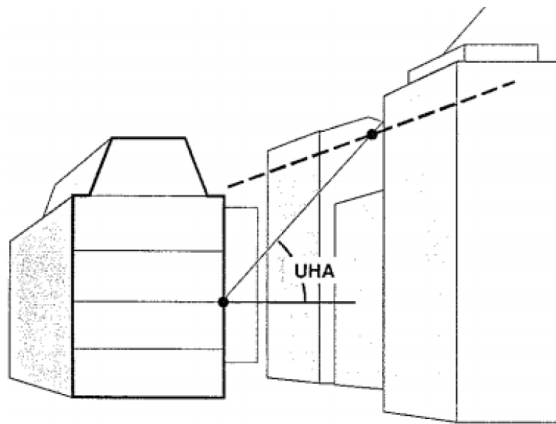


Figure I.11 – Illustration de l'angle d'obstruction présenté dans la méthode LT - tirée de Vermeulen, 2014 [15].

Une autre traduction du problème de l'accès au soleil en ville est le concept d'« enveloppe solaire », défini et développé par Knowles dans les années 1970 [69]. Il met l'accent sur l'importance d'assurer aux bâtiments une bonne exposition au rayonnement solaire pour encourager l'usage de l'énergie solaire dans le bâtiment. L'enveloppe solaire définit la hauteur maximale constructible d'un site à respecter pour assurer l'accès des bâtiments voisins existants à un minimum d'heures d'ensoleillement. Knowles a renommé ce concept en « enveloppe pour le droit solaire » [70] (ou SRE pour *Solar Right Envelope*). Ses travaux [71] montrent comment l'enveloppe solaire peut être utilisée pour guider la conception de quartiers. Ainsi, la partie gauche de la figure I.12 montre les enveloppes solaires à respecter dans un quartier résidentiel de Los Angeles pour garantir au moins 6 h de soleil à partir de 6 m de hauteur pour tous les bâtiments voisins. La partie droite de la figure montre un exemple de blocs d'habitations dont la morphologie est conforme à cette contrainte.

En 1997, Capeluto et Shaviv [72] ont défini l'« enveloppe pour l'exposition au Soleil » (ou SCE pour *Solar Collection Envelope*) comme étant la surface limite en dessous de laquelle un bâtiment construit sur un site donné sera impacté par des ombres projetées par les bâtiments voisins. Les mêmes auteurs ont utilisé ce concept pour définir un « volume solaire » compris entre la SCE et la

4. Page 28, Thibaut Vermeulen : *Optimisation de formes urbaines soumises au rayonnement solaire*. Thèse de doctorat, Physique urbaine. Compiègne : UTC, 2014.

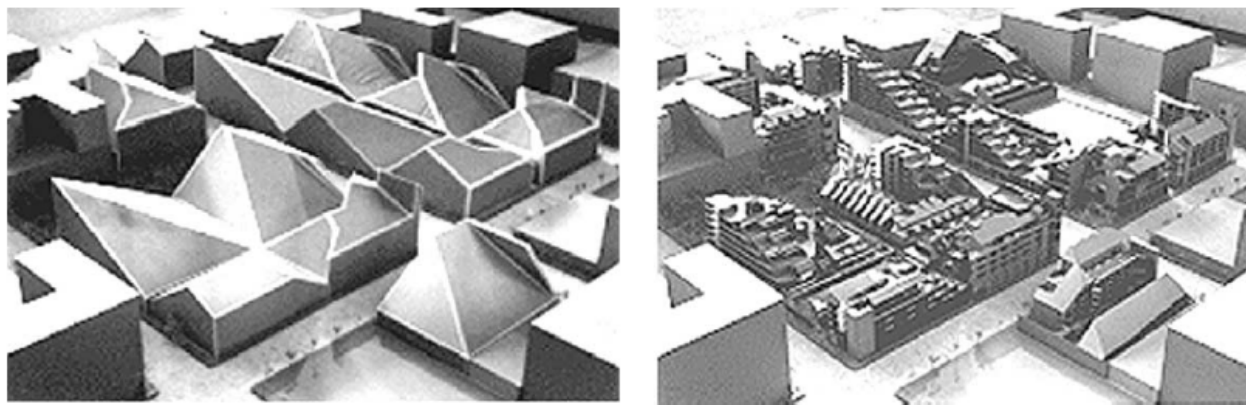


Figure I.12 – Application du concept d'enveloppe solaire à un quartier de Los Angeles - tirée de Knowles, 2003 [71].

SRE, qui englobe donc les surfaces qui n'altèrent pas le droit au soleil des parcelles voisines et qui ne sont pas masquées par les bâtiments qui y sont construits. La figure I.13 donne un exemple de modélisation d'un tel volume.

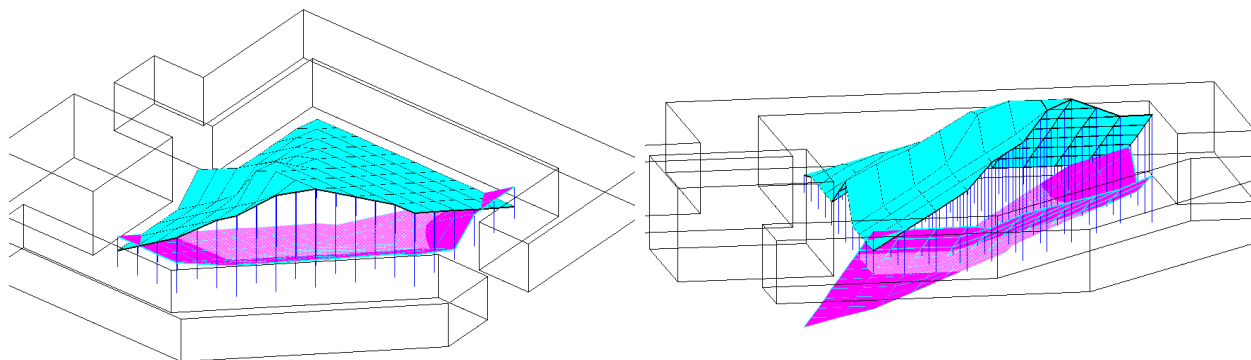


Figure I.13 – Illustration du volume solaire défini par la SRE (en bleu) et la SCE (en rose) - tirée de Capeluto et Shaviv, 1997 [72].

Par la suite, les mêmes chercheurs ont développé le modèle SustArc pour calculer le volume solaire maximum qui peut être construit sur un site, sur une certaine période de l'année [73].

A partir du début des années 1980 et pendant une trentaine d'années, de nombreuses méthodes de définition et calcul des enveloppes solaires ont fait leur apparition [74, 75]. Par ailleurs, les « surfaces iso-solaires » proposées par Ratti et Morello en 2005 [76] ont ajouté une dimension énergétique aux enveloppes solaires. Une surface iso-solaire est une enveloppe en trois dimensions qui reçoit en tout point une quantité précise de rayonnement solaire (en W/m^2) pendant une période définie. Contrairement à l'enveloppe solaire qui ne s'intéresse qu'au rayonnement solaire direct, la surface iso-solaire considère aussi le rayonnement solaire diffus. Réparti sur la voûte céleste, ce rayonnement est constitué de la part des rayons du soleil qui sont déviés par les particules atmosphériques et donc transmis indirectement à la surface terrestre. La modélisation de surfaces iso-solaires permet de comparer plusieurs niveaux de rayonnement solaire reçu, c'est à dire d'irradiation solaire incidente sur une même parcelle. Comme pour l'enveloppe solaire, on distingue deux types de surfaces iso-solaires :

- les *Iso-solar Rights Surfaces* (IRS), qui définissent les hauteurs maximales constructibles d'un site à respecter pour assurer un certain niveau d'irradiation solaire incidente sur les sites adjacents (voir [figure I.14](#)),
- les *Iso-solar Collection Surfaces* (ICS), qui caractérisent les surfaces les plus basses sur lesquelles on peut garantir un certain niveau d'irradiation solaire incidente, en tenant compte des ombres projetées par les bâtiments voisins.

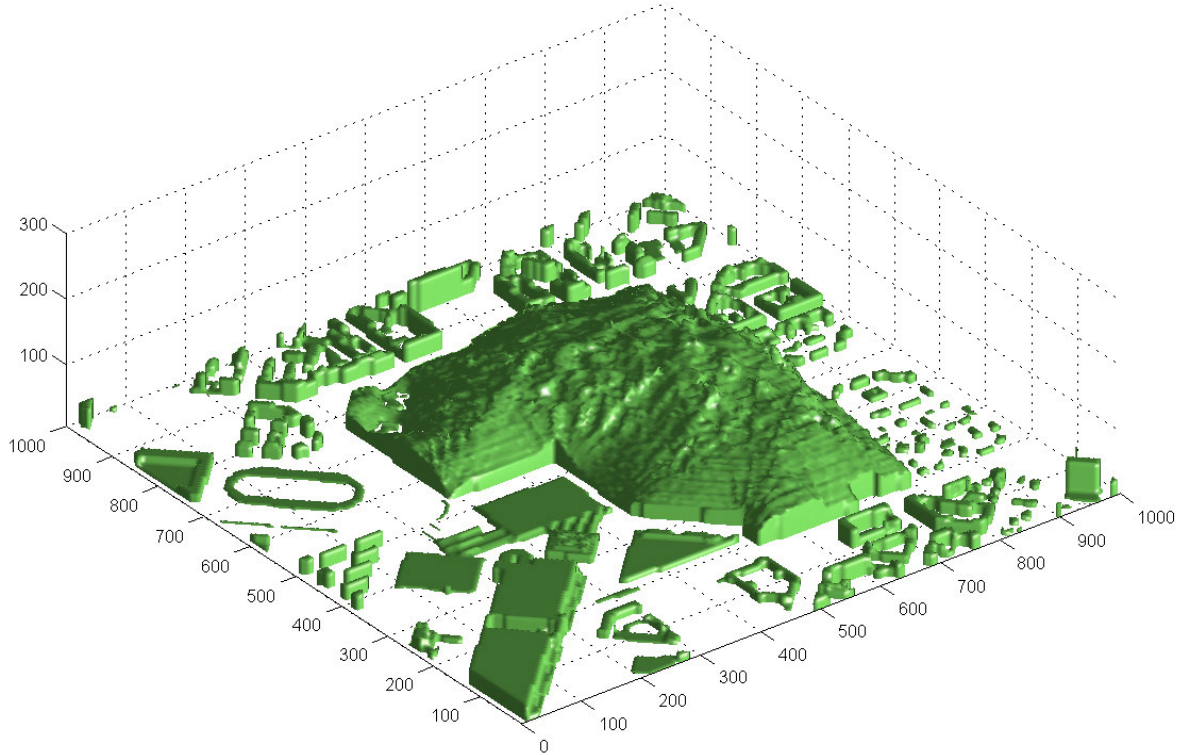


Figure I.14 – Aperçu d'IRS modélisées pour une parcelle de Milan, basées sur une irradiation de 260 W/m^2 - tiré de Ratti et Morello, 2005 [76].

Il existe aussi de nombreux outils spécialement créés pour évaluer le potentiel solaire de bâtiments à l'échelle urbaine, comme l'atteste l'état de l'art réalisé en 2015 par Freitas *et al.* [77]. Certains d'entre eux, dotés d'une interface de visualisation en trois dimensions (3D) qui simplifie leur utilisation, sont commercialisés. On trouve notamment dans cette catégorie le logiciel TOWNSCOPE⁵ qui a bénéficié de nombreuses améliorations depuis son développement dans les années 1990, ainsi que Skelion⁶, module créé en 2011 pour le logiciel de modélisation 3D SketchUp⁷. D'autres modèles répertoriés sont basés sur un système d'information géographique (SIG, ou GIS pour *Geographic Information System*), système d'information conçu pour la collecte, le stockage, le traitement, l'analyse, la gestion et la présentation de tous types de données spatiales et géographiques. On trouve parmi eux l'algorithme SOL [78] développé dans le langage de programmation Matlab⁸.

5. TOWNSCOPE - www.townscope.com.

6. Skelion - www.skelion.com.

7. SketchUp - www.sketchup.com.

8. Matlab - fr.mathworks.com/products/matlab.html.

3.2.2 Utilisation d'outils de simulation thermique dynamique à l'échelle urbaine

Les outils de simulation thermique dynamique (STD) des bâtiments permettent non seulement d'évaluer la quantité de rayonnement solaire reçue par les bâtiments mais aussi de connaître rapidement le comportement thermique annuel de projets de construction très détaillés. L'intérêt de tels logiciels pour les professionnels du bâtiment est, en particulier, de connaître la quantité d'énergie à apporter heure par heure dans un bâtiment pour assurer le confort de ses occupants. Les fichiers de données météorologiques utilisés pour la simulation sont généralement obtenus à partir de mesures effectuées sur des sites dégagés, comme des aéroports. Les constructions entourant le bâtiment étudié sont souvent prises en compte dans les outils de STD pour calculer le rayonnement solaire reçu par ce dernier. En revanche, les mesures de température issues des stations météorologiques sont rarement corrigées pour prendre en compte le microclimat local. Lorsque le contexte du bâtiment étudié est urbain - ce qui est très souvent le cas - les données utilisées pour la STD ne sont donc pas représentatives du microclimat qui entoure ce bâtiment et peuvent conduire à des erreurs d'évaluation de ses besoins énergétiques [79].

Les outils de STD ne sont pas tous égaux en termes de modalités de calcul du rayonnement de courtes longueurs d'onde (CLO) et du rayonnement de grandes longueurs d'onde (GLO) reçus par les surfaces des bâtiments étudiés. Le rayonnement solaire CLO (direct et diffus) qui atteint un quartier est en partie réfléchi par le sol et par les parois des bâtiments, et ce phénomène peut s'avérer non-négligeable, particulièrement en milieu urbain [80]. En ce qui concerne le rayonnement GLO, réaliser un bilan radiatif complet consiste à prendre en compte les flux infrarouges émis et reçus par les parois des bâtiments ainsi que les échanges avec le sol et la voûte céleste. Au sujet de cette dernière, les particules des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère absorbent une partie du rayonnement de grande longueur d'onde émis par la surface terrestre et peuvent le réémettre, donnant alors lieu au phénomène de contre-rayonnement [80].

EnergyPlus⁹ [81] est l'un de ces outils de STD. Développé depuis le début des années 2000 par le département de l'Energie des Etats-Unis d'Amérique - en particulier par le *National Renewable Energy Laboratory* ou NREL - il s'agit d'une fusion entre deux programmes (DOE-2 et BLAST) nés dans les années 1970. Dans la suite de ce manuscrit, on remplacera EnergyPlus par le diminutif « E+ ». Dans E+ il est possible de choisir un modèle qui calcule les coefficients de transfert de chaleur par convection - que l'on nommera « coefficients de transfert convectif » par la suite - extérieur à chaque pas de temps en tenant compte de l'évolution de la vitesse et de la direction du vent, si ces données sont renseignées dans le fichier météo utilisé. E+ prend en compte les rayonnements CLO reçus par les surfaces extérieures des bâtiments, en provenance du soleil, des parois des bâtiments voisins, du sol et de la voûte céleste. Une seule réflexion solaire est calculée, donc la réflexion du rayonnement solaire sur les parois des bâtiments après avoir été réfléchi par le sol (et *vice versa*) n'est pas considérée. En ce qui concerne le bilan radiatif GLO, les échanges entre les surfaces extérieures des bâtiments ne sont pas modélisés et la température de surface du sol est considérée comme étant égale à celle de l'air extérieur. La mise en données des modèles de bâtiments avant STD par E+ peut

9. EnergyPlus - www.energyplus.net.

être facilitée grâce au logiciel OpenStudio¹⁰. Un *plug-in* permet de créer des bâtiments exploitables par OpenStudio avec SketchUp : les pièces créées peuvent être directement converties en zones thermiques utilisables par E+ pour la STD. Le logiciel DesignBuilder¹¹ - autre outil utilisant E+ - regroupe dans la même interface la modélisation 3D du bâtiment, sa mise en données, le lancement de simulations et la visualisation des résultats.

Dans la même veine, Rhinoceros¹² est un puissant outil de modélisation 3D qui peut être couplé à DIVA [82] pour les calculs des performances énergétiques des bâtiments en utilisant E+¹³. Un couplage direct entre Rhinoceros et E+ a par ailleurs servi de base au développement de la plateforme de modélisation urbaine UMI¹⁴ [83]. Grâce à l'utilisation du logiciel DAYSIM¹⁵ (qui utilise le moteur de calcul RADIANCE¹⁶) UMI est capable d'évaluer non seulement la consommation d'énergie mais aussi l'éclairage naturel, le confort extérieur et la « marchabilité »¹⁷ (*walkability* en anglais) à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Une analyse du confort extérieur dans un quartier de Boston est présentée sur la figure I.15 : les points chauds en été sont détectés d'après le nombre d'heures au cours desquelles la température extérieure T_{air} dépasse 28 °C et s'ils sont exposés au rayonnement solaire direct (image (a)), les points froids en hiver sont détectés d'après le nombre d'heures au cours desquelles T_{air} est inférieure à 5 °C et s'ils ne sont pas exposés au rayonnement solaire direct (image (b)).

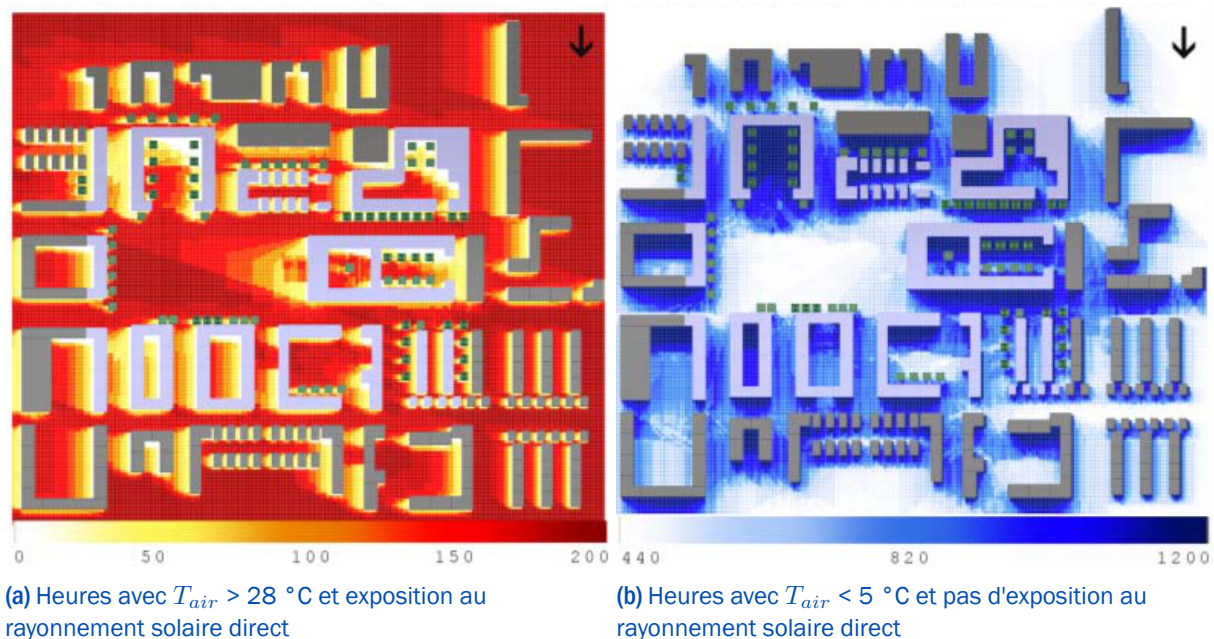


Figure I.15 – Analyse du confort extérieur dans un quartier de Boston avec UMI - d'après Reinhart, 2013 [83].

10. OpenStudio - www.openstudio.net.

11. DesignBuilder - www.designbuilder.co.uk.

12. Rhinoceros - www.rhino3d.com/fr/features.

13. www.diva4rhino.com/user-guide/simulation-types/thermal-analysis.

14. UMI - www.urbanmodeling.net.

15. DAYSIM - www.daysim.ning.com.

16. RADIANCE - www.radiance-online.org/about/detailed-description.html.

17. La « marchabilité » mesure à quel point la marche à pied est agréable ou non dans une zone donnée.

Autre logiciel utilisant E+ comme outil de STD, ArchiWIZARD¹⁸ intègre un module de calcul des apports solaires *via* la méthode de lancer de rayons, ou *Ray-Tracing* [84]. Cette approche permet un calcul fin des masques solaires proches et lointains, ce qui s'avère notamment intéressant pour l'étude de typologies urbaines [85]. En revanche, les calculs de STD n'utilisent pas ces résultats, les apports solaires sont alors calculés par E+. ArchiWIZARD comporte aussi un module de calcul réglementaire, qui permet de vérifier qu'un projet de construction est conforme à la réglementation thermique actuellement en vigueur en France pour la construction des bâtiments neufs, appelée RT 2012.

Ces exemples montrent qu'E+ est un logiciel particulièrement populaire, mais il existe de nombreux autres outils de STD de bâtiments. C'est le cas de TRNSYS¹⁹ [86] (*TRaNsient SYstem Simulation program*), ESP-r²⁰ [87], SIMSPARK [54] (plateforme dérivée de l'environnement SPARK, pour *Simulation Problem Analysis for Research Kernel*), CoDyBa²¹ [88] (COmportement DYnamique des BATiments) et IES-VE²² [89] (*Integrated Environmental Solutions - Virtual Environment*). La bibliothèque BuildSysPro open source²³ [90], écrite en langage Modelica²⁴, peut être utilisée avec les environnements de modélisation et de simulation OpenModelica²⁵ et Dymola²⁶ pour la STD de bâtiments. Une présentation détaillée de cet outil, qui permet de réaliser des bilans radiatifs CLO et GLO particulièrement complets, est faite dans la [partie 2 du chapitre III](#).

L'environnement logiciel Pleiades+COMFIE²⁷ dispose d'une interface de modélisation 3D nommée Alcyone²⁸ ainsi que d'un moteur de calcul pour la STD, nommé COMFIE et développé par le Centre Efficacité énergétique des Systèmes (CES) de Mines ParisTech depuis 1990 [91]. A partir de 1993, le Groupement d'Etude et de Formations sur les Outils Solaires et les Alternatives Technologique (GEFOSAT)²⁹ puis la société IZUBA énergies³⁰ depuis 2001 ont développé l'environnement logiciel Pleiades+COMFIE. Dans la suite de ce manuscrit, on remplacera Pleiades+COMFIE par le diminutif « P+C ». COMFIE utilise pour l'instant des coefficients de transfert convectif extérieur constants. Pour chaque type de paroi, l'utilisateur peut choisir entre trois niveaux d'exposition au vent, ce qui détermine la valeur du coefficient utilisé. Le bilan radiatif effectué par COMFIE prend en compte les rayonnements CLO en provenance du soleil, du sol et de la voûte céleste. Les inter-réflexions solaires entre les parois extérieures des bâtiments ne sont pas considérées. Les échanges radiatifs et convectifs entre les surfaces extérieures des bâtiments et l'environnement sont inclus dans un coefficient d'échange extérieur global, qui représente aussi de manière simplifiée les

18. ArchiWIZARD - www.graitec.com/fr/archiwizard.asp.

19. TRNSYS - www.trnsys.com.

20. ESP-r - www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_overview.htm.

21. CoDyBa - www.jnlog.com/codyba1.htm.

22. IES-VE - www.iesve.com.

23. BuildSysPro - www.github.com/edf-enerbat/BuildSysPro.

24. Modelica - www.modelica.org.

25. OpenModelica - www.openmodelica.org.

26. Dymola - www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola.

27. Pleiades+COMFIE - www.izuba.fr/logiciel/pleiadescomfie.

28. Alcyone - www.izuba.fr/logiciel/alcyone.

29. GEFOSAT - www.gefosat.org.

30. IZUBA énergies - www.izuba.fr.

échanges radiatifs GLO. Les variations spatio-temporelles de l'intensité du rayonnement GLO émis par la voûte céleste et le sol ne sont pas prises en compte.

Par ailleurs, un module d'éclairage naturel des locaux (Enelight) qui utilise RADIANCE est intégré à P+C. La [figure I.16](#) montre comment cet outil peut être utilisé pour évaluer l'impact de l'environnement urbain (deux bâtiments de quatre étages) sur l'éclairage naturel reçu à l'intérieur du rez-de-chaussée d'un bâtiment [92]. P+C facilite aussi la réalisation d'analyses de cycle de vie à l'échelle du bâtiment ou du quartier *via* un couplage avec le logiciel novaEQUER³¹, développé conjointement par le CES de Mines ParisTech et IZUBA énergies depuis 1995.

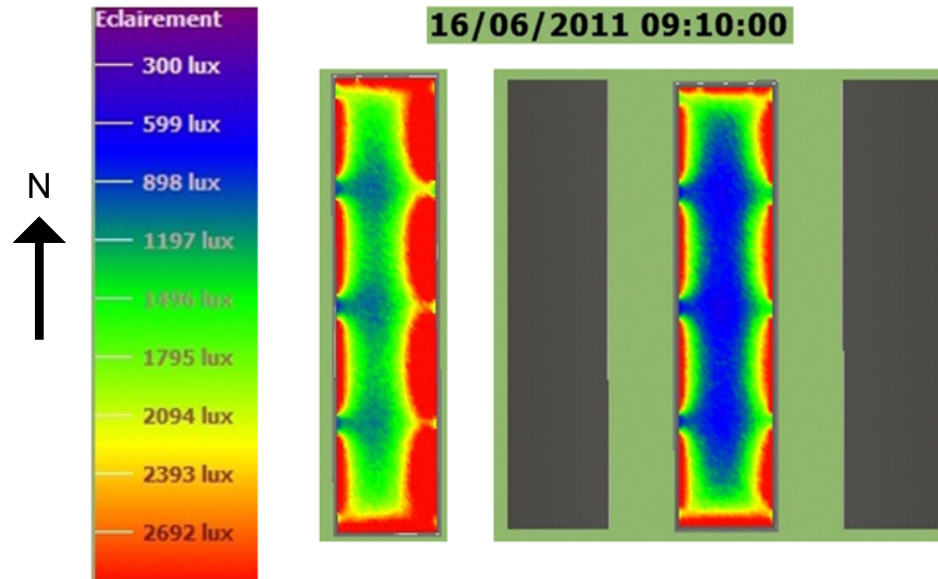


Figure I.16 – Niveaux d'éclairage naturel pour un bâtiment seul (gauche) et encadré de deux masques solaires (droite), calculés avec P+C - d'après Ribault, 2014 [92].

3.2.3 Outils d'évaluation du microclimat urbain

Certaines plateformes numériques permettent d'évaluer précisément l'impact des choix d'aménagement urbain grâce à la simulation du microclimat urbain. La richesse de ces plateformes va généralement de pair avec une complexité qui réserve leur usage à des experts du domaine et un temps de calcul qui ne permet pas d'estimer rapidement le comportement thermique des bâtiments sur une année complète.

C'est le cas de l'ensemble d'outils logiciels Solene-Microclimat [93], qui utilise le modèle thermo-radiatif Solene³² [94] développé depuis les années 1990 au sein du Centre de Recherche Nantais Architectures Urbanités (CRENAU). Solene mesure sur chaque face de chaque bâtiment d'un quartier le flux global incident qui provient du soleil, ainsi que les inter-réflexions solaires entre ces faces et le sol grâce à la méthode des radiosités [80, 94]. Solene permet aussi de réaliser un bilan radiatif GLO complet - tel que défini au début de [la partie 3.2.2](#). - sur chaque surface des bâtiments.

31. novaEQUER - www.izuba.fr/logiciel/novaequer.

32. Solene - www.aau.archi.fr/crenau/solene.

Solene peut être couplé [95] avec le logiciel de mécanique des fluides numérique (plus connu sous le nom de CFD pour *Computational Fluid Dynamics*) Code_Saturne³³ développé par Électricité De France (EDF) pour former Solene-Microclimat qui peut ainsi prendre en compte les phénomènes aérodynamiques urbains. La figure I.17 montre la distribution des coefficients de transfert convectif (CHTC pour *Convective Heat Transfer Coefficient*) calculés par Solene-Microclimat pour les surfaces extérieures d'un quartier de Strasbourg. Sur ce cas d'étude, on observe en moyenne 24 % de différence entre ces coefficients évalués grâce à Code_Saturne, en prenant en compte les mouvements d'air extérieur, et ceux basés sur une vitesse de vent homogène [93]. Ces écarts se répercutent sur les températures de surface extérieure des bâtiments et peuvent amener à des estimations de besoins énergétiques sensiblement différentes, en particulier pour des bâtiments à faible isolation thermique.

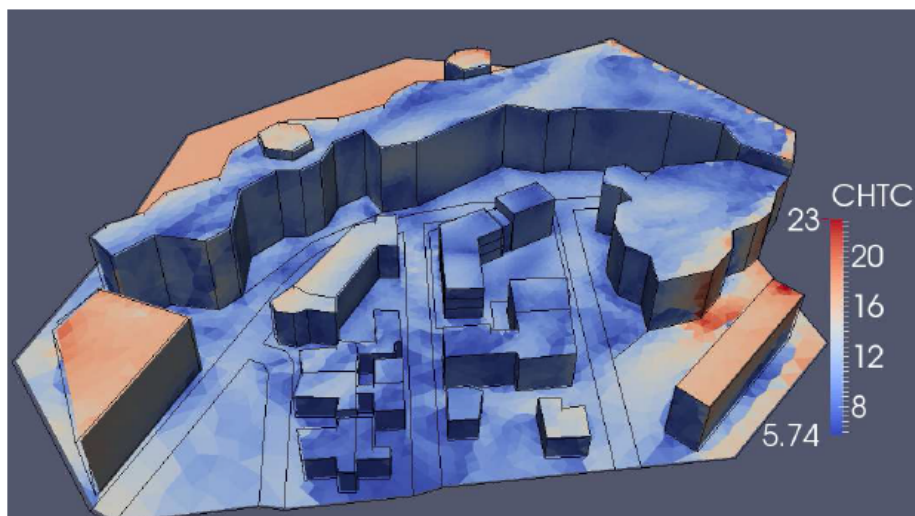


Figure I.17 – Distribution des coefficients de transfert convectif extérieur dans un quartier de Strasbourg, calculés avec Solene-Microclimat - tirée de Morille et al., 2015 [93].

Les outils ENVI-met³⁴ [96] et EnviBatE [97] sont aussi des outils de simulation du microclimat urbain. Le modèle 3D ENVI-met est conçu pour simuler les interactions entre les surfaces (de sol et des bâtiments), la végétation et l'air dans un environnement urbain. Le modèle EnviBatE a été développé dans une optique de diminution du temps de calcul. Plus simple qu'ENVI-met et Solene-Microclimat, il permet d'estimer dans un temps plus court (48h pour la première étude réalisée [97]) la demande énergétique horaire de tous les bâtiments d'un quartier sur une année entière, en prenant en compte le climat urbain local. Pour avoir un aperçu plus large des études d'évaluation du microclimat urbain publiées à ce jour, on pourra se rapporter à l'état de l'art publié en 2015 par Toparlar *et al.* en introduction de leurs travaux [98].

3.2.4 Etudes d'impact du contexte urbain sur le bilan énergétique des bâtiments

Des travaux de recherche ont été menés pour mesurer l'influence de l'environnement urbain d'un bâtiment sur sa performance énergétique, en utilisant certains des outils cités dans la partie 3.2.2. Ainsi, Strømman-Andersen et Sattrup [99] ont évalué l'impact des interactions entre les bâtiments de

33. Code_Saturne - www.code-saturne.org.

34. ENVI-met - www.envi-met.com.

différents « canyons urbains » sur leurs consommations d'énergie pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage artificiel (l'éclairement naturel reçu dans ces bâtiments est calculé). La méthode utilisée s'appuie sur IES-VE pour la STD et sur Radiance pour les calculs d'éclairement naturel. Les résultats montrent qu'un bâtiment situé dans un environnement urbain dense type « canyon urbain » peut avoir une consommation d'énergie totale jusqu'à 30 % supérieure à celle qu'il aurait en site dégagé dans le cas d'un immeuble de bureaux, et jusqu'à 19 % dans le cas d'un immeuble de logements.

Pisello *et al.* [100] ont adopté une autre approche en évaluant l'impact de l'environnement urbain d'un bâtiment sur la précision de l'évaluation de sa performance énergétique. Cette dernière a été estimée en comparant les résultats de la simulation thermique dynamique avec E+ du bâtiment seul puis au sein du « réseau de bâtiments » qui l'entoure. Le cas d'étude choisi est un bloc compact de 20 maisons individuelles américaines, situé soit à Minneapolis (climat continental froid) soit à Miami (climat quasi tropical). Les auteurs ont conclu que ne pas prendre en compte l'« effet inter-bâtiments » dans ces situations reviendrait à commettre une erreur de sous-estimation des besoins énergétiques de 32 % en hiver à Minneapolis et une surestimation de 58 % en été à Miami.

Good *et al.* [9] se sont intéressés à l'irradiation solaire reçue par un système photovoltaïque de 200 m² installé sur le toit d'un immeuble de bureau situé à Trondheim, en considérant le bâtiment dans un contexte totalement dégagé puis dans son environnement réel. Les résultats des calculs d'ensoleillement effectués avec DIVA montrent que l'effet de masque solaire dû aux bâtiments qui entourent le cas d'étude entraîne une réduction de 28 % du rayonnement solaire que le système photovoltaïque recevrait en site libre. La figure I.18 donne un aperçu des résultats obtenus avec et sans environnement urbain.

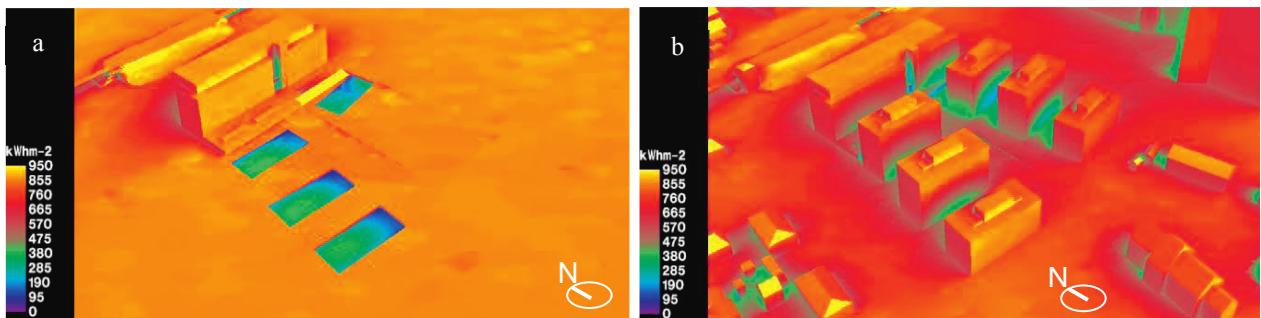


Figure I.18 – Irradiation solaire incidente sur le site (en kWh.m²) avec le bâtiment seul (a) puis entouré de son environnement urbain (b) - d'après Good et al., 2014 [9].

Les études présentées ici n'utilisent pas des outils permettant de prendre en compte de façon complète l'environnement des bâtiments. Néanmoins, ces travaux soulignent l'importance de prendre en compte les bâtiments voisins pour toute étude énergétique de bâtiment situé dans un environnement urbain et montrent que densifier les villes peut pénaliser le bilan énergétique des bâtiments. Après avoir fait des constats comparables à ceux-ci, Vartholomaios [101] a développé un outil dérivé de l'enveloppe solaire : l'enveloppe du bloc solaire résidentiel (appelée *Residential Solar Block envelope* en anglais). Il s'agit d'une méthode de conception d'un ensemble de bâtiments fortement compact qui maximise l'exploitation du potentiel solaire par chacun des bâtiments, en particulier pour réduire leur consommation de chauffage.

Par ailleurs, au cours de ses travaux de thèse présentés en 2015 [102] Merlier a étudié en détail les liens entre la morphologie urbaine et les processus aérodynamiques qui se développent dans la canopée urbaine. Elle a ainsi montré que l'environnement urbain d'un bâtiment a un impact non négligeable sur les conditions aérodynamiques autour de ce bâtiment, donc sur ses besoins énergétiques induits par les infiltrations d'air et les échanges thermiques convectifs sur ses façades. Il faudrait donc prendre en compte l'aérodynamisme urbain lors de l'étude d'un bâtiment intégré dans un quartier. Néanmoins, Merlier a précisé que la généralisation de l'approche développée dans sa thèse nécessiterait des moyens de calculs très importants.

3.3 Vers l'optimisation à l'échelle urbaine

Les méthodes et outils présentés jusqu'ici peuvent être utilisés pour améliorer « manuellement » les performances de bâtiments dans leur environnement urbain de façon itérative, c'est à dire en testant successivement différentes solutions jusqu'à ce que les résultats obtenus soient satisfaisants. Cette façon de procéder - souvent qualifiée d'« optimisation » dans le langage courant - peut conduire à une exploration restreinte de l'espace des solutions disponibles, selon la patience des concepteurs et le temps qu'ils souhaitent allouer au projet. En effet, pour la plupart des problèmes de conception de bâtiment, la grande taille de l'espace des solutions rend son exploration « manuelle » très chronophage pour les professionnels concernés.

Afin de leur faciliter la tâche, certaines pistes d'optimisation automatisée - c'est à dire reposant sur des méthodes d'optimisation telles que celles décrites dans [la partie 2 de ce chapitre](#) - ont été explorées et des recherches sont en cours sur cette thématique.

Pour commencer, l'outil Rhinocéros précédemment cité peut être couplé avec l'éditeur d'algorithmes Grasshopper³⁵ pour optimiser la morphologie de scènes urbaines vis-à-vis de critères environnementaux, dont l'ensoleillement. Grasshopper intègre des algorithmes évolutionnaires pour une optimisation globale qui va approcher le résultat optimal, avant d'affiner la solution finale avec un algorithme d'optimisation locale. Marin *et al.* ont présenté en 2013 [103] la première version de l'outil EcoGen³⁶ (alors nommé EC-CO-GEN), qui utilise Rhinocéros et Grasshopper pour l'optimisation multicritère de la morphologie d'un ensemble de nouveaux bâtiments dans un environnement urbain existant, principalement destiné aux architectes. Les trois fonctions objectifs sont la maximisation de la compacité de l'ensemble de bâtiments, la minimisation de ses besoins de chauffage - évalués de façon simplifiée à travers le calcul de Degrés Jour Unifiés (DJU)³⁷ - et la minimisation des ombres projetées sur l'environnement bâti. Les utilisateurs peuvent influencer sur le déroulement du processus d'optimisation grâce à l'algorithme génétique interactif développé au cours de ces travaux. Nous reviendrons sur ce sujet dans [la partie 3.4.2 du chapitre IV](#).

Entre 2009 et 2012 Arantes [104] a développé une méthode d'optimisation par algorithme génétique de la morphologie d'un morceau de ville en utilisant aussi Rhinocéros et son *plug-in* Grasshop-

35. Grasshopper - www.grasshopper3d.com.

36. EcoGen - www.aria.archi.fr/index.php/recherche/axe-1/eco-conception-generative/ecogen.

37. Cette méthode d'évaluation est décrite dans la thèse de Marin [14], pages 143 à 146.

per. En revanche, Grasshopper est ici utilisé uniquement comme éditeur d'algorithmes permettant la visualisation graphique 3D. Le processus d'optimisation génétique est basé sur l'outil Bianca [105], acronyme de « BIo-ANalyse de Composites Assemblés ». Trois critères sont considérés : la densité de population dans le quartier, la performance énergétique des bâtiments qui le composent, et leur accès à l'ensoleillement. Plusieurs optimisations sont réalisées en traitant un seul critère comme fonction objectif et en considérant un des deux autres comme une contrainte. Par exemple, la [figure I.19](#) présente les résultats de deux optimisations effectuées pour répondre au même problème : maximiser le bilan énergétique total du quartier pour une densité comprise entre 280 et 320 habitants par hectare.

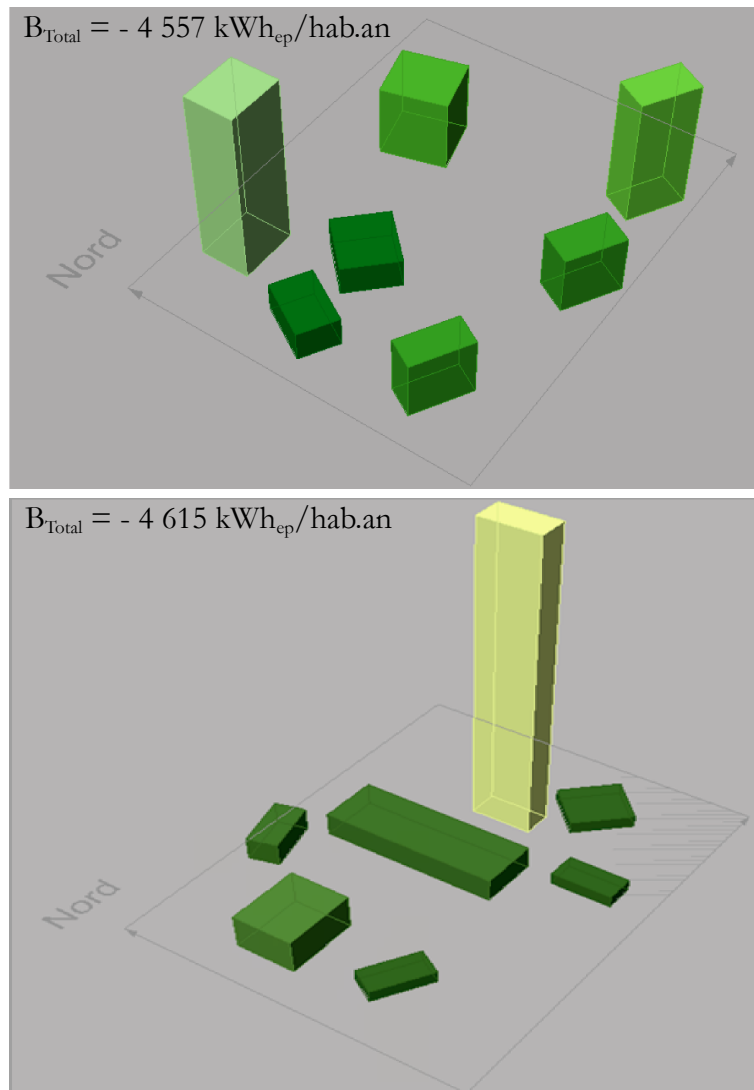


Figure I.19 – Résultats de deux minimisations par algorithme génétique du bilan énergétique total d'un quartier pour une densité comprise entre 280 et 320 hab./ha - d'après Arantes, 2013 [104].

Ce bilan est calculé à partir d'un outil d'évaluation simplifiée de la performance énergétique des bâtiments. Ces résultats sont particulièrement intéressants car ils montrent que pour le même problème d'optimisation, deux résultats dont les fonctions objectifs ont des valeurs très proches peuvent correspondre à deux morphologies urbaines très différentes.

Certaines équipes de recherche ont développé leur propre modèle d'évaluation du potentiel solaire d'un ensemble de bâtiments simplifiés, et ont étudié comment optimiser l'utilisation de ce potentiel en couplant ce modèle avec un algorithme génétique. Les rayonnements solaires direct et diffus, ainsi que les inter-réflexions entre bâtiments, sont pris en compte. Ainsi, Oliveira Panão *et al.* ont présenté en 2008 [106] des travaux visant à maximiser l'absorption solaire d'un ensemble de bâtiments en hiver et la minimiser en été. Les variables considérées sont la hauteur, la longueur et la largeur de tous les bâtiments, celle des rues les séparant ainsi que l'orientation de l'ensemble. L'optimisation est menée pour quatre latitudes différentes. Avec une approche similaire, mais plus topologique que morphologique, Conceição António *et al.* ont exposé en 2014 [107] une étude sur le placement optimal de bâtiments sur une surface donnée pour maximiser l'irradiation solaire reçue aussi bien par les toits que par les façades. La [figure I.20](#) représente la solution obtenue pour un ensemble de 9 bâtiments.

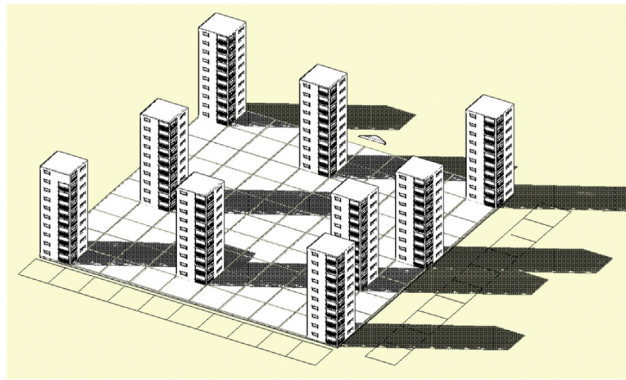


Figure I.20 – Solution topologique maximisant le potentiel solaire pour un ensemble de 9 bâtiments - tirée de Conceição António *et al.*, 2014 [107].

Dans un autre registre, Dillenburger *et al.* ont décrit en 2009 [108] leur méthode d'optimisation conjuguée de critères de qualité et de coût. Ils ont développé un outil de génération de volume 3D et le processus d'optimisation a été conduit grâce à une stratégie d'évolution. La [figure I.21](#) montre un extrait de la population de solutions obtenue à l'issue de l'optimisation de la forme d'un ensemble bâti de bureaux. Il s'agit ici de minimiser le « coût de circulation » des employés pour permettre une meilleure communication entre eux, tout en assurant un éclairage naturel suffisant dans les espaces de travail. Par ailleurs, Kämpf et Robinson ont décrit en 2010 [109] leurs recherches sur la maximisation du potentiel solaire à l'échelle d'un quartier en étudiant deux cas : un groupe de bâtiments dont la hauteur de chacun est variable, et un grand bloc urbain dont la morphologie de la (ou des) toiture(s) est paramétrée. Ils utilisent pour cela leur propre algorithme évolutionnaire hybride (nommé CMA-ES/HDE pour *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy and Hybrid Differential Evolution algorithm*) développé lors de travaux antérieurs [110] spécialement pour l'optimisation de formes urbaines.

Vermeulen a développé au cours de sa thèse soutenue en 2014 [15] diverses méthodes d'optimisation monocritère de la forme d'un quartier par rapport au rayonnement solaire, en adaptant un algorithme évolutionnaire aux particularités des paramètres urbains. La maximisation de l'énergie radiative incidente sur les surfaces des bâtiments est utilisée comme première fonction objectif pour



Figure I.21 – Extrait de la population finale obtenue - d'après Dillenburger et al., 2009 [108].

optimiser la hauteur de 25 bâtiments de base rectangulaire, disposés sur une grille elle aussi rectangulaire. Le même exercice est réalisé cette fois-ci sur des bâtiments de base hexagonale disposés sur une grille de forme hexagonale, permettant ainsi d'offrir six orientations différentes au rayonnement solaire et d'avoir une analyse plus fine de la « réponse géométrique du quartier aux trajets solaires »³⁸. Ce quartier hexagonal est réutilisé en changeant la fonction objectif, qui est cette fois le facteur de vue du ciel. Les travaux précédents ont été réalisés en considérant des quartiers situés dans un environnement complètement dégagé. Par la suite, neuf bâtiments de base rectangulaire disposés sur une grille carrée de 3*3 ont été étudiés dans un contexte urbain pré-existant, représenté par une couronne de bâtiments de 5 étages. Les bâtiments peuvent cette fois non seulement être déformés lors du processus d'optimisation, mais aussi déplacés et tournés.

Ensuite, l'auteur a considéré un tissu urbain régulier constitué de cellules urbaines identiques et a cherché à déterminer s'il existe des cellules urbaines optimales pour obtenir le rayonnement solaire direct cumulé maximal sur l'ensemble des façades. La hauteur de chaque bâtiment peut varier de 0 à 10 étages et des essais d'optimisation ont été réalisés pour différentes journées, différents volumes bâtis du quartier (en pourcentage du volume maximal possible) et différentes tailles de cellule, entre une grille de 2x2 bâtiments et une grille de 6x6. Pour finir, un îlot représentant un morceau de quartier parisien simplifié a été optimisé par rapport aux besoins de chauffage de ses bâtiments, calculés sans prendre en compte les apports internes liés aux occupants, en utilisant le logiciel CitySim sur lequel nous reviendrons dans [la partie 3.2 du chapitre II](#). Les variables de ce problème d'optimisation monocritère sont tout d'abord uniquement les hauteurs des bâtiments, puis les pourcentages de surface vitrée sur chacune des façades de l'îlot sont aussi paramétrés. La méthode utilisée repose sur l'algorithme CMA-ES/HDE. La [figure I.22](#) représente la meilleure solution trouvée avec les hauteurs des bâtiments pour seules variables. Les bâtiments existants autour de l'îlot urbain optimisé ont été modélisés comme de simples masques solaires.

Contrairement aux exemples présentés précédemment, dans lesquels le projet évalué concerne la construction d'un ensemble de bâtiments, les travaux d'Echenagucia *et al.* [111] portent sur l'optimisation de la conception d'un unique bâtiment. Le processus repose sur un couplage entre E+ et l'algorithme génétique NSGA-II. Différents climats sont testés (Turin et Palerme en Italie, Francfort en Allemagne et Oslo en Norvège) ainsi que deux environnements : isolé - sans aucun bâtiment au voisinage du bâtiment étudié - et urbain. Dans ce deuxième cas, le contexte urbain est représenté par une grille de bâtiments rectangulaires de 26 m de haut, placés à 14 m de distance les uns des autres comme indiqué sur la [figure I.23](#).

38. Page 89, Thibaut Vermeulen : *Optimisation de formes urbaines soumises au rayonnement solaire*. Thèse de doctorat, Physique urbaine. Compiègne : UTC, 2014.

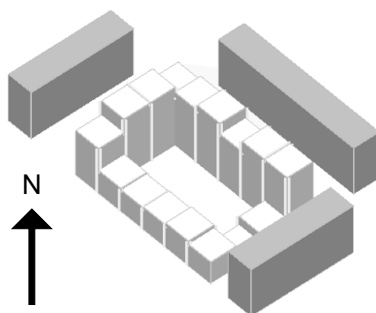


Figure I.22 – Solution permettant de minimiser les besoins de chauffage d'un îlot urbain (variables : hauteur des bâtiments) - d'après Vermeulen, 2014 [15].

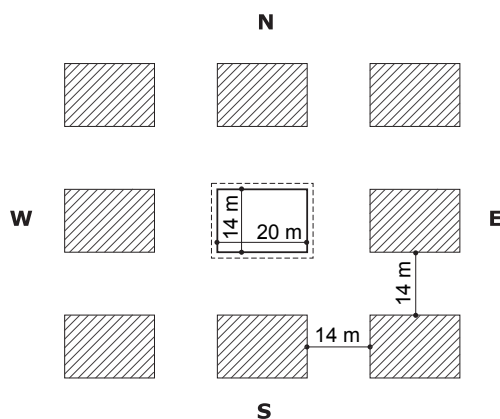


Figure I.23 – Géométrie du contexte urbain - d'après Echenagucia et al., 2015 [111].

Le bâtiment étudié a une base rectangulaire de 20 x 14 m et une hauteur de 4 m. Sa forme est fixée, les paramètres que l'algorithme d'optimisation fait varier sont l'épaisseur de la maçonnerie des façades, le nombre, la forme, la disposition des fenêtres ainsi que les caractéristiques des vitrages. Trois fonctions objectifs sont considérées : la minimisation des besoins énergétiques du bâtiment pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage. Seules deux fonctions sont traitées simultanément afin de représenter les résultats sous la forme de fronts de Pareto en deux dimensions.

4 Synthèse △

Dans la première partie de ce chapitre nous avons explicité le fonctionnement des algorithmes évolutionnaires et montré quelle place ils occupent parmi les méthodes d'optimisation existantes, et plus précisément parmi celles qui visent à résoudre des problèmes multicritères. Nous avons ensuite mis l'accent sur le succès que rencontrent les algorithmes génétiques pour l'optimisation de la conception de bâtiments, avant de décrire le plus populaire d'entre eux dans ce domaine : NSGA-II.

Dans la deuxième partie du chapitre nous avons évoqué l'émergence de l'architecture bioclimatique au cours du siècle dernier et les nombreuses recherches qui l'ont suivie, portant notamment sur l'amélioration de l'utilisation de l'énergie solaire dans les bâtiments. Ainsi, diverses technologies de façades ont été expérimentées. Des travaux plus théoriques ont porté sur l'optimisation informa-

tique de la composition de certaines parois des bâtiments, voire sur l'optimisation de la morphologie du bâtiment entier. Dans les études que nous mentionnons l'optimisation se fait en utilisant des algorithmes génétiques, et plus particulièrement NSGA-II dans la majorité des cas. Le but recherché est la plupart du temps la minimisation des besoins énergétiques du bâtiment, incluant toujours l'énergie nécessaire au chauffage et bien souvent celle liée à l'éclairage artificiel et au refroidissement. Beaucoup d'études visent aussi à obtenir le plus faible coût de construction de la façade, ou du bâtiment entier selon l'échelle considérée. Cette orientation redondante des études d'optimisation dans le domaine du bâtiment a été récemment confirmée dans un ouvrage de référence [6], où deux autres critères d'évaluation sont ajoutés à ceux de consommation énergétique et de coût : « la satisfaction de l'occupant (confort) et [...] l'analyse du cycle de vie »³⁹. On ne retrouve pas parmi ces objectifs les fondements de l'approche bioclimatique, qui cherche avant tout à tirer profit au maximum des ressources naturelles de l'environnement. Nous avons évoqué brièvement les travaux de Chesné et ceux du projet VALERIE, qui proposent de nouveaux indicateurs de performance directement liés à l'exploitation de ces ressources. Un exemple d'optimisation de la conception d'un bâtiment vis-à-vis de la part de la ressource solaire effectivement utilisée a été présenté. L'environnement urbain du bâtiment n'a pas été considéré dans cette étude.

A l'échelle du quartier, la problématique de l'accès au soleil en ville a été étudiée de différentes façons, parmi lesquelles le concept d'enveloppe solaire a fait l'objet de nombreux développements. Au cours des dernières années, la montée en puissance des outils informatiques a conduit à l'émergence de logiciels dédiés à l'évaluation du potentiel solaire de plusieurs bâtiments. Cette fonctionnalité est aussi incluse dans de nombreux logiciels de calcul du bilan énergétique de bâtiments, voire de bilan environnemental plus complet à l'échelle du quartier ou de la ville.

L'essor de l'optimisation énergétique à l'échelle du quartier est récent. Les travaux repérés traitent généralement de la maximisation du flux solaire reçu globalement par l'ensemble des bâtiments considérés, sans distinguer plus précisément l'usage qui est fait de cette énergie. Certains auteurs cherchent néanmoins à minimiser les besoins de chauffage d'un îlot de bâtiments, en jouant principalement sur la morphologie de chacun d'entre eux. Rares sont les travaux qui prennent en compte un environnement urbain autour des bâtiments optimisés, et lorsque c'est le cas les bâtiments existants sont considérés comme de simples masques solaires. Parmi ces exceptions, un couplage entre un logiciel de simulation thermique dynamique et un algorithme d'optimisation a été utilisé pour minimiser les besoins énergétiques d'un bâtiment - dont la forme est fixée - dans un contexte urbain, en jouant sur des caractéristiques de l'enveloppe de ce nouveau bâtiment. Par ailleurs, contrairement à ceux qui existent à l'échelle de la paroi ou du bâtiment, aucun outil incluant des notions de coût de construction n'a été repéré dans la littérature.

Après ce tour d'horizon des outils existants pour l'optimisation de la conception d'un ou plusieurs bâtiment(s), le chapitre suivant questionne la pertinence de leur application à la densification d'un îlot urbain.

39. Page 343, Frédéric Wurtz et Gilles Fraisse dans l'ouvrage coordonné par Bruno Peuportier : *Énergétique des bâtiments et simulation thermique*. Eyrolles, 2016, 446 p.

Pertinence des outils existants pour une intégration dans une méthode d'optimisation de la conception d'un bâtiment neuf dans un îlot urbain

Table des matières

1	Introduction	36
2	Caractéristiques attendues pour un outil pertinent	36
2.1	Utilité pour l'aide à la décision	36
2.1.1	Concordance entre l'outil et les besoins des utilisateurs potentiels	37
2.1.2	Accessibilité	39
2.2	Attentes d'une plateforme de simulation quartier	41
2.2.1	Prise en compte des phénomènes physiques prépondérants à cette échelle	41
2.2.2	Adaptation des modèles au degré de connaissance des bâtiments	44
3	Positionnement des outils existants vis-à-vis du besoin exprimé	46
3.1	Outils de STD existants et usages courants	46
3.1.1	Pleiades+COMFIE	46
3.1.2	EnergyPlus	51
3.2	Outils spécifiques pour des études à l'échelle du quartier ou de la ville	54
3.3	Etude de faisabilité : optimisation d'un projet de densification avec un outil de STD.	55
3.3.1	Modélisation du cas d'étude	56
3.3.2	Résultats des STD	58
3.3.3	Optimisation multicritère	60
3.3.4	Bilan	65
4	Positionnement du projet ANR MERUBBI	66
4.1	De la définition d'indicateurs de potentiel et de performance bioclimatiques...	66
4.2	...à leur utilisation pour l'évaluation de projets de densification urbaine	68
5	Synthèse	70

1 Introduction

Le premier chapitre de cette thèse a mis en avant l'émergence récente d'outils d'optimisation à l'échelle du quartier, et identifié certaines caractéristiques qu'ils partagent. Ainsi, si la minimisation des besoins énergétiques des bâtiments est traitée dans certains travaux, les critères économiques comme le coût de construction ne semblent pas avoir été considérés à cette échelle, contrairement à ce qu'on a pu observer pour l'optimisation d'un bâtiment seul. De la même façon, des indicateurs de performance bioclimatique ont été utilisés pour optimiser la conception d'un bâtiment isolé, mais le passage à l'échelle du quartier n'a pas été réalisé. Du côté des variables des problèmes d'optimisation à l'échelle d'un îlot urbain, les études repérées se focalisent souvent sur la morphologie des bâtiments ou sur leur disposition les uns par rapport aux autres.

De plus, la plupart des travaux d'optimisation de quartiers cherchent à améliorer la conception de bâtiments dans un environnement totalement dégagé. Certaines études prennent en compte un contexte urbain autour des bâtiments optimisés, mais seules les performances de ces derniers sont mesurées. L'impact de l'implantation de ces nouveaux bâtiments sur le bilan énergétique de ceux qui existent déjà n'est donc pas évalué.

Enfin, nous avons souligné en introduction de cette thèse le besoin d'un outil d'aide à la décision à destination des concepteurs de projets de densification des îlots urbains (architectes et techniciens de bureaux d'étude). Dans ce deuxième chapitre de thèse, nous détaillons les caractéristiques idéales d'un tel outil, en explicitant son caractère innovant compte tenu de l'état de l'art exposé dans le premier chapitre. Nous choisissons ici de traiter la phase amont de conception de projets de densification urbaine, étape dont nous précisons les caractéristiques. Nous évaluons ensuite la pertinence de certains outils existants pour répondre au besoin identifié, avant de présenter la démarche mise en œuvre dans le projet ANR MERUBBI.

2 Caractéristiques attendues pour un outil pertinent

2.1 Utilité pour l'aide à la décision

Cherqui soulignait en 2005 [112] que : « l'intérêt des méthodes d'aide à la décision est justifié dans le cas où la recherche de la solution n'est pas immédiate »¹. La conception de projets de densification urbaine se place dans ce cadre. Il s'agit tout d'abord de concevoir un nouveau bâtiment (ou plusieurs), ce qui implique de composer avec des objectifs qui peuvent s'avérer contradictoires comme la minimisation des besoins de chauffage du bâtiment, la minimisation de ses besoins de rafraîchissement, la minimisation de son coût de construction, un apport suffisant en lumière naturelle dans les pièces de vie, la maximisation d'indices de confort des occupants, etc. Lorsque l'on se place dans un contexte de densification urbaine, ce nouveau bâtiment vient se placer à proxi-

1. Page 32, Frédéric Cherqui : *Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier - méthode ADEQUA*. Thèse de doctorat, Génie Civil. La Rochelle : Université de la Rochelle, 2005.

mité de bâtiments existants et peut avoir un impact non négligeable sur leur bilan énergétique. La prise en compte des performances des bâtiments existants parmi les critères de conception du projet de densification rend alors la prise de décision plus complexe : si le bâtiment neuf est le plus haut du quartier il profitera bien de la ressource solaire, mais il pénalisera peut être beaucoup l'exploitation de cette ressource par certains bâtiments environnants. Ces constats montrent que les décideurs intervenant dans des projets de densification d'îlots urbains peuvent effectivement avoir besoin d'outils pour les aider à mieux comprendre les impacts de leurs décisions.

S'il semble justifié de proposer de tels outils d'assistance, encore faut-il que les personnes ciblées - à savoir les équipes de conception de bâtiments qui conseillent les décideurs - veuillent les utiliser. Duforestel rappelait en 2015 [47] que : « les concepteurs de bâtiments peuvent tout-à-fait accepter l'usage d'outils ou de méthodes complexes, mais à condition qu'ils soient faits pour eux. »².

2.1.1 Concordance entre l'outil et les besoins des utilisateurs potentiels

Etant donné que les projets de densification urbaine concernent la plupart du temps la construction d'un bâtiment qui sera occupé tout au long de l'année, les choix de conception vont se baser sur des résultats de simulations réalisées sur une année entière. De plus, des facteurs comme l'ensoleillement ou l'occupation d'un bâtiment peuvent provoquer de fortes variations des températures intérieures au sein d'une même journée. On ne peut se contenter de donner des ratios annuels, qui ne permettraient pas de vérifier - au moins *a priori* - quelle est la quantité d'énergie à apporter à chaque heure et chaque jour de l'année pour assurer le confort des occupants du bâtiment. Un outil d'aide à la conception de tels projets doit donc être capable de réaliser des STD annuelles de différentes variantes du bâtiment étudié et fournir des résultats heure par heure. Pour rester à la portée de professionnels qui disposent d'un temps limité pour chaque étude, ces STD doivent être réalisées dans un temps aussi court que possible.

Par ailleurs, une note publiée en 2015 [113] rapporte que : « souvent, la densification d'un quartier ou d'un îlot pâtit d'une mauvaise image auprès des riverains de la future opération. »³ et que cette densification est notamment synonyme pour eux de « perte d'ensoleillement »³. Il serait donc utile pour les concepteurs d'un projet de densification de disposer d'un outil d'aide à la décision capable d'évaluer l'impact de leur projet sur les bâtiments existants, ce qui n'existe pas actuellement d'après l'état de l'art que nous avons présenté dans le chapitre I. Ceci leur donnerait des éléments supplémentaires pour défendre la pertinence du projet auprès des occupants de ces bâtiments. Pour cela l'idéal est de réaliser aussi des STD annuelles sur les bâtiments de l'environnement urbain du projet de densification, ce qui renforce l'intérêt de la rapidité d'exécution de ces simulations.

Dans la partie 2.4 du chapitre I nous avons mis en avant l'intérêt de l'optimisation multicritère pour aider les décideurs à faire des choix éclairés. Nous avons aussi montré que parmi les méthodes d'optimisation multicritère, les algorithmes génétiques sont les plus utilisés dans le domaine du

2. Page 132, Thierry Duforestel : *Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique : recherches sur l'efficacité énergétique des bâtiments*. Habilitation à diriger des recherches. Lyon : Université Claude Bernard Lyon 1, 2015.

3. Page 9, Club des chargés d'aménagement de la DDT de l'Isère : *Comment favoriser la densification ?* Note. Grenoble : Direction départementale des territoires de l'Isère, 2015, 29 p.

bâtiment. Il serait donc pertinent, pour un outil d'aide à la conception de projets de densification urbaine, d'intégrer une méthode d'optimisation multiobjectif par algorithme génétique. Ceci nécessite d'utiliser un logiciel de STD paramétrable de façon automatique, afin que les individus créés à chaque génération du processus d'optimisation puissent être évalués sans nécessiter d'intervention humaine. L'optimisation par algorithme génétique consiste, comme nous l'avons détaillé dans la [partie 2.2 du chapitre I](#), à faire évoluer une population d'individus au cours de générations successives. A chaque itération, chaque nouvel individu doit être évalué pour que l'on puisse connaître ses performances vis-à-vis des objectifs fixés. Une méthode d'optimisation par algorithme génétique d'un projet de densification urbaine nécessite donc de réaliser un grand nombre de STD, ce qui vient une fois de plus plaider en la faveur de temps de simulation raisonnables.

Par ailleurs, les bâtiments neufs sont de plus en plus énergétiquement performants, de plus en plus étanches et sont donc de plus en plus sensibles à certains paramètres environnementaux comme la variation des apports solaires. Comme le dit Duforestel [47] : « Cette sensibilité aux aléas climatiques accrédite l'idée d'une conception bioclimatique : si les effets du climat sont si importants, pourquoi ne pas concevoir le bâtiment selon ce critère ? »⁴. De plus, l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments par l'augmentation de l'épaisseur d'isolant dans leurs parois atteint ses limites, puisque l'efficacité de l'isolation décroît avec son épaisseur. Il apparaît alors que : « le seul gisement de performance énergétique qui reste disponible pour le bâtiment (hors équipements) est dans son environnement. »⁵. Dans ces conditions, il est particulièrement opportun de proposer aux concepteurs de projets de densification urbaine un outil permettant d'en estimer les performances bioclimatiques, c'est à dire l'exploitation des ressources de l'environnement des bâtiments pour couvrir leurs besoins énergétiques. Nous avons vu précédemment que des tests d'optimisation de la conception d'un bâtiment vis-à-vis de ses performances bioclimatiques ont été réalisés, et que l'application de la méthode à l'échelle du quartier reste à faire.

De plus, les concepteurs des bâtiments sont soumis à des contraintes économiques, étant donné que le projet de construction ne dispose jamais d'une enveloppe budgétaire illimitée. Avant de valider un projet, ses financeurs vont s'intéresser à ses coûts de construction et d'exploitation, et certains d'entre eux peuvent être intéressés par les coûts de maintenance, voire de rénovation et de démolition. L'intégration de critères de performance économique dans le processus d'optimisation semble alors particulièrement importante pour ancrer l'outil d'aide à la décision dans la réalité du monde de la construction. Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre de cette thèse, cette intégration ne semble pas avoir été réalisée pour des outils d'optimisation à l'échelle du quartier.

Enfin, le secteur du bâtiment avec ses différentes phases (construction, exploitation, réhabilitation et déconstruction) est responsable d'une part importante des impacts environnementaux en France. Ces impacts sont détaillés dans l'ouvrage de Peuportier [114], qui présente aussi des indicateurs qui permettent d'évaluer les conséquences potentielles des choix techniques faits par les concepteurs des bâtiments ou des quartiers. Ces indicateurs sont d'une grande diversité : énergie

4. Page 137, Thierry Duforestel : *Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique : recherches sur l'efficacité énergétique des bâtiments*. Habilitation à diriger des recherches. Lyon : Université Claude Bernard Lyon 1, 2015.

5. Page 177, *idem*.

primaire consommée, potentiel d'eutrophisation⁶, quantité d'air pollué, écotoxicité exprimée en pourcentage d'espèces disparues par mètre carré et par an, etc. Peuportier indique que deux principaux outils ont été développés dans le domaine de l'évaluation de la qualité environnementale : l'analyse de cycle de vie (ACV) et l'évaluation de la performance environnementale, mais que cette dernière « n'est pas adaptée à l'étude globale d'un bâtiment »⁷. En 2015, Lamé et Leroy [115] ont présenté les résultats d'entretiens réalisés auprès de professionnels impliqués dans la conception de bâtiments, qui montrent que l'ACV est l'outil d'écoconception le plus connu de ces derniers. Il semblerait donc judicieux, pour un outil d'aide à la conception de projets de densification urbaine, de prendre en compte la qualité environnementale du projet en faisant appel à un logiciel d'ACV. Néanmoins, Lamé et Leroy ont relevé de nombreux freins à la généralisation de l'ACV qui laissent penser que cet outil n'est pas - pour l'instant - adapté à notre problématique. Parmi les limites liées à l'implémentation de l'ACV, on retient en particulier la difficulté d'obtenir le grand nombre de données nécessaires à sa réalisation. Les professionnels ont aussi exprimé un manque d'engouement pour cette méthode trop peu valorisée dans les processus de certification par rapport à son prix, et pour laquelle il n'existe pas de référentiel stable de comparaison des résultats.

2.1.2 Accessibilité

Pour être accepté et pris en main par les concepteurs de projets de densification, l'outil d'aide à la conception doit être accessible à ces derniers. On peut pour cela veiller à les impliquer dans le processus d'optimisation, au minimum en leur permettant de choisir les critères qu'ils souhaitent optimiser ainsi que les plages de variation des paramètres sur lesquels ils veulent jouer. L'affichage des valeurs des critères obtenues doit être le plus clair possible, et l'accès à des représentations 3D des solutions obtenues peut améliorer l'appropriation de la méthode par le concepteur. Au cours de sa thèse [14] Marin a fait tester à des étudiants en architecture un prototype d'outil d'assistance visant à favoriser et stimuler une conception architecturale créative, fondé sur un algorithme génétique. Un modeleur graphique couplé au processus d'optimisation permet l'affichage 3D des populations, comme le montre la figure II.1. À l'issue de ces tests, Marin remarque que : « une visualisation globale de l'évolution des populations semble pouvoir servir la compréhension du processus et limiter la sensation de perte de contrôle de la part du concepteur. »⁸.

Le concepteur peut être impliqué de façon plus forte dans la démarche d'optimisation si on lui permet, par exemple, d'intervenir au cours du déroulement d'un processus d'optimisation par algorithme génétique. Cela peut passer par la visualisation des individus qui constituent la population courante, et par des possibilités de valorisation ou de pénalisation de certains individus pour influencer la suite de l'opération d'optimisation. C'est ce que propose l'outil EcoGen qui était en 2016, d'après Marsault et Lequay [116] : « le seul outil interactif d'optimisation bioclimatique

6. Le potentiel d'eutrophisation est lié à l'apport de nitrates et phosphates dans l'eau qui entraîne une surcroissance des algues.

7. Page 132, Bruno Peuportier : *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*. Les Presses MINES ParisTech, 2008, 336 p.

8. Page 207, Philippe Marin : *Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale : mise en œuvre d'un algorithme génétique guidé par les qualités solaires passives de l'enveloppe*. Thèse de doctorat, Sciences de l'architecture. Nancy : INPL, 2010.

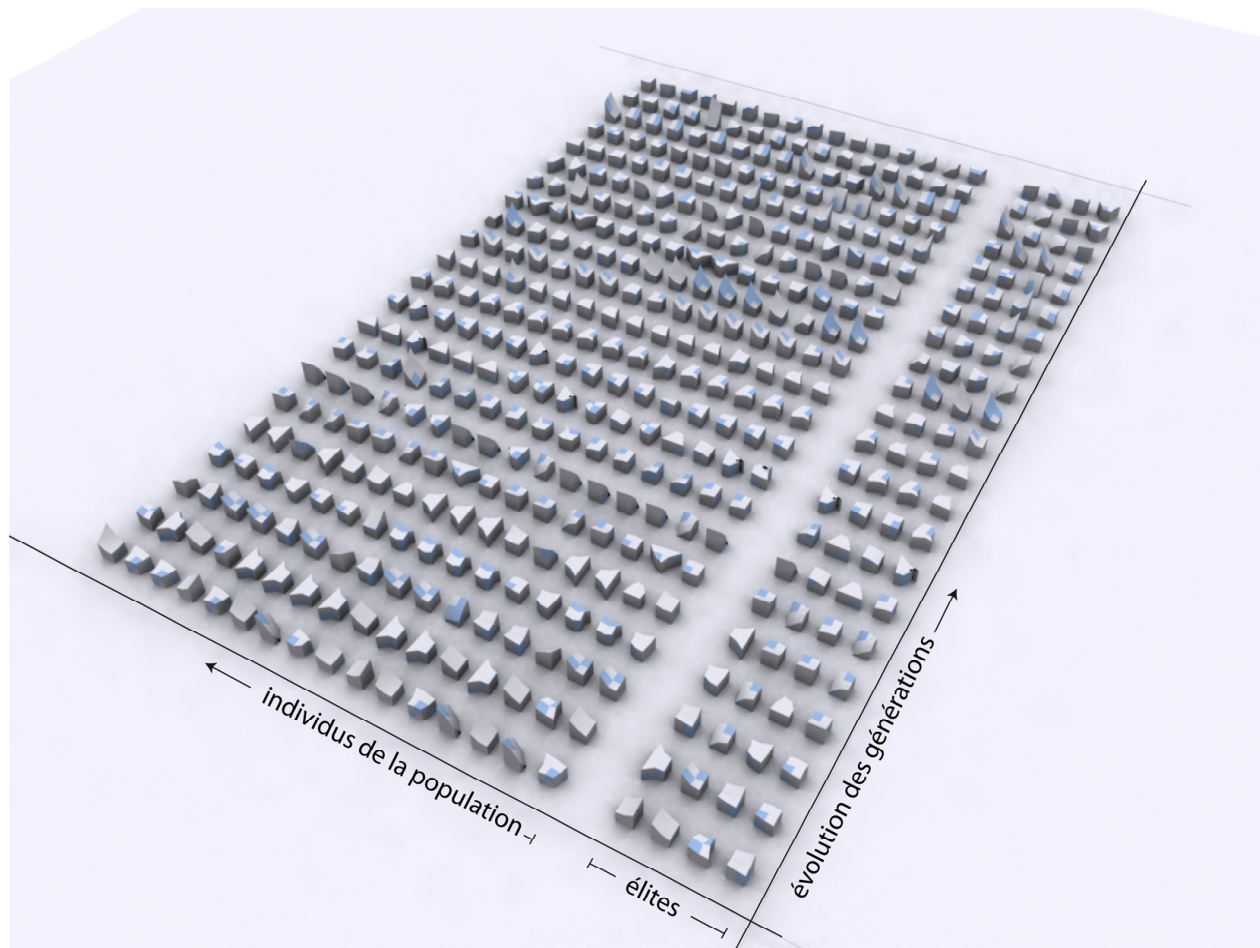


Figure II.1 – Exemple d'affichage de populations d'individus et des élites conservées - tiré de Marin, 2010 [14].

multicritère en phase de conception initiale d'un ou de plusieurs bâtiments dans un environnement construit (îlot, parcelle). »⁹. Si cette affirmation concerne un domaine particulier, à savoir l'aide à la conception de bâtiments en phase esquisse, lorsque ni leur morphologie ni leur placement ne sont fixés, cette publication souligne plus généralement que très peu de travaux traitent de l'optimisation interactive de bâtiments dans un environnement urbain.

L'accessibilité d'un outil d'aide à la conception peut aussi être abordée d'un point de vue financier. En effet, un tel outil peut faire appel à des logiciels soumis à des licences payantes, par exemple pour effectuer des STD ou pour piloter l'optimisation multicritère du projet. Certains utilisateurs potentiels risquent alors de se détourner de cet outil si son utilisation les oblige à investir dans de nouvelles licences. Il semble donc préférable de se tourner vers une plateforme d'aide à la conception constituée, dans la mesure du possible, de logiciels gratuits et *open source*, notion dont on trouvera une description complète sur le site de référence sur le sujet¹⁰.

9. Page 7, Xavier Marsault et Hervé Lequay : Éco-conception pré-architecturale générative : jusqu'où peut-on aller ? Enjeux, possibilités, méthodes. *Séminaire de Conception Architecturale Numérique*, septembre 2016, Toulouse, France.

10. *The Open Source Definition* - www.opensource.org/osd.

2.2 Attentes d'une plateforme de simulation quartier

2.2.1 Prise en compte des phénomènes physiques prépondérants à cette échelle

Lorsque l'on veut évaluer des projets de densification urbaine, on se place à une échelle « quartier » puisqu'il s'agit d'intégrer un nouveau bâtiment dans un îlot urbain existant. Avec l'évolution des réglementations thermiques et des normes environnementales, les nouveaux bâtiments doivent être de plus en plus performants. Dans la partie 3.2.4 du chapitre I nous avons relevé certains travaux comparant les performances énergétiques évaluées pour des bâtiments isolés puis dans un contexte urbain dense, qui montrent de fortes différences entre les deux situations. Pour évaluer correctement les consommations énergétiques d'un bâtiment en milieu urbain il est donc primordial de prendre en compte son environnement. Il s'agit, plus précisément, d'estimer l'impact de cet environnement sur les flux mobilisés à l'interface bâtiment-environnement. Ces flux sont les suivants :

- « flux de chaleur par convection (modifié par la vitesse de l'air à proximité des parois et les variations locales de la température extérieure) ;
- flux solaire (direct, diffus, réfléchi) ;
- flux de chaleur par rayonnement infrarouge échangé avec la voûte céleste et les surfaces environnantes ;
- flux dus à la ventilation et aux infiltrations. »¹¹

A cette échelle d'étude, en 2011 les travaux de Bouyer *et al.* [95] ont montré que les flux solaires sont ceux qui ont le plus d'influence sur le bilan énergétique des bâtiments, ce que Bouyer avait déjà mis en évidence dans sa thèse [117] qui confirmait « la prégnance du flux solaire dans le bilan d'énergie »¹².

Bozonnet rappelle aussi l'importance de l'ensoleillement dans sa thèse [80] et indique que le calcul de l'ensoleillement solaire total d'une paroi peut se décomposer en trois étapes : la détermination des masques solaires pour la paroi étudiée, le calcul des éclairissements solaires incidents direct et diffus au niveau de cette paroi, et le calcul des inter-réflexions solaires pour déterminer l'éclairissement diffus issu de l'environnement de la paroi.

Dans de nombreux logiciels de STD, le calcul des éclairissements solaires incidents direct et diffus est fait à partir de valeurs issues de données météorologiques, réduites en fonction des effets de masques solaires proches ou lointains dûs à l'environnement modélisé. Une étude [92] a été réalisée en 2014 avec cet outil de STD pour mettre en évidence l'importance de la prise en compte des masques solaires dans l'évaluation des besoins énergétiques des bâtiments. Dans cette étude, aucune réflexion solaire n'est prise en compte sur les surfaces extérieures des bâtiments. Deux cas sont étudiés. Le premier est un bâtiment de bureau à base rectangulaire de 1000 m² de surface au sol et composé de quatre étages identiques. Le bâtiment est constitué d'une seule zone thermique. La composition de

11. Page 251, Marjorie Musy et Emmanuel Bozonnet, dans l'ouvrage coordonné par Bruno Peuportier : *Énergétique des bâtiments et simulation thermique*. Eyrolles, 2016, 446 p.

12. Page 247, Julien Bouyer : *Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*. Thèse de doctorat, Sciences pour l'ingénieur. Nantes : Université de Nantes, 2009.

son enveloppe est celle conseillée dans P+C pour les Bâtiments Basse Consommation (BBC), avec une surface vitrée égale à 25 % de la surface de chacune des parois verticales. Ce « bâtiment de base » est utilisé pour créer le deuxième cas, un îlot de trois bâtiments tous identiques au premier cas, séparés de 10 m les uns des autres. La [figure II.2](#) illustre ces deux cas d'étude.

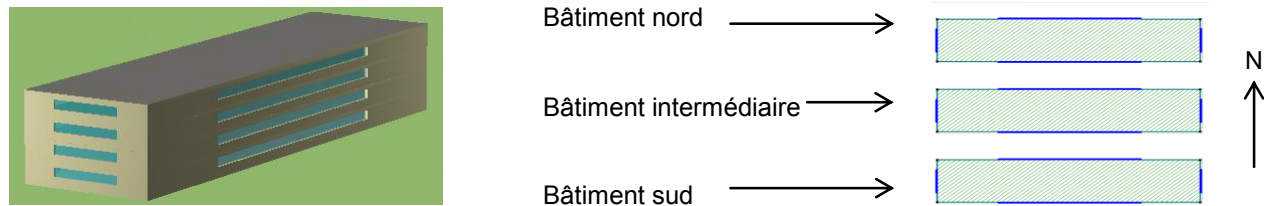


Figure II.2 - Illustration des deux cas étudiés : bâtiment seul (à gauche) et îlot (à droite) - d'après Ribault, 2014 [92].

Les besoins de chauffage et de refroidissement (notés « besoins de climatisation » dans l'étude) ont été calculés aussi bien pour le bâtiment seul que pour chacun des trois bâtiments de l'îlot. Pour ces derniers, ces besoins ont été calculés en faisant varier la distance entre le bâtiment intermédiaire et ses voisins par pas de 5 m, de 5 à 30 m. Les résultats obtenus - présentés sur les figures [II.3](#) et [II.4](#) - montrent que les effets de masques entre bâtiments peuvent avoir un impact considérable sur leur bilan énergétique, en particulier pour les bâtiments dont la façade sud est impactée par un masque solaire proche, comme c'est le cas pour le « Bâtiment nord » et le « Bâtiment intermédiaire ». En effet, lorsque l'écart entre les bâtiments est de 5 m, l'augmentation des besoins de chauffage par rapport au bâtiment seul est de 22 % pour le « Bâtiment intermédiaire » et 19 % pour le « Bâtiment nord ». Dans la même configuration, la diminution des besoins de refroidissement par rapport au bâtiment seul est de 22 % pour le « Bâtiment intermédiaire » et 14 % pour le « Bâtiment nord ». Il est donc positif que la prise en compte de ces effets soit permise par les outils de STD les plus courants. On notera cependant que cette prise en compte est conditionnée par la modélisation des masques solaires présents dans l'environnement des bâtiments étudiés, ce qui n'est pas toujours fait dans les projets de construction.

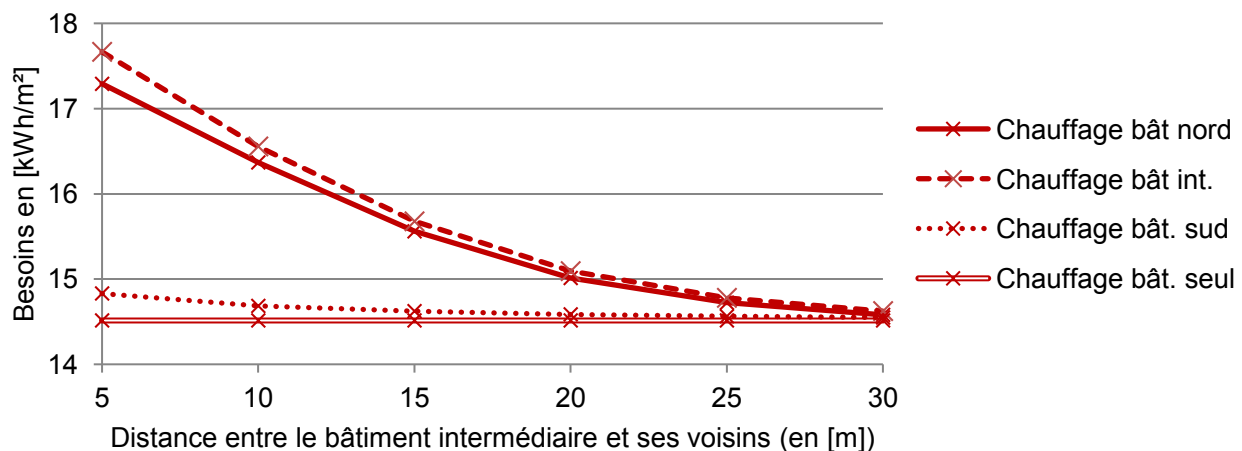


Figure II.3 - Evolution des besoins de chauffage en fonction de la distance entre bâtiments - tirée de Ribault, 2014 [92].

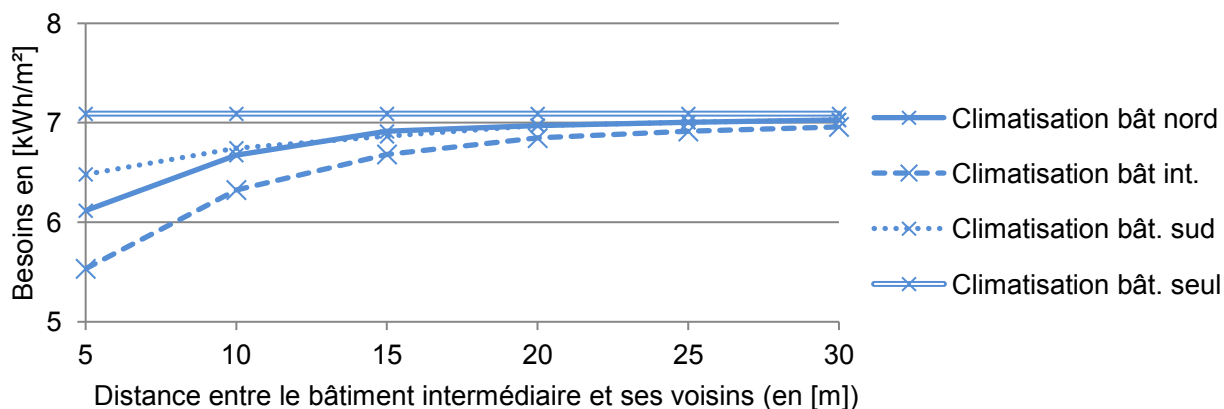


Figure II.4 – Evolution des besoins de climatisation en fonction de la distance entre bâtiments - tirée de Ribault, 2014 [92].

Dans ses travaux de thèse [80] Bozonnet indique que, contrairement aux effets de masques, « le calcul des inter-réflexions CLO n'est pas toujours réalisé du fait de la complexité et des temps de calcul qui peuvent être élevés pour des géométries complexes »¹³. C'est le cas pour les résultats présentés précédemment, étant donné qu'à l'heure actuelle le calcul des réflexions CLO sur la surface extérieure des bâtiments n'est pas intégré dans P+C. Ce point peut conduire à des erreurs d'évaluation importantes, comme le montre Bozonnet en comparant pour l'ensemble des parois d'une rue canyon :

- l'éclairement solaire total (diffus + direct) reçu par les parois, calculé avec l'outil Solene ;
- l'éclairement solaire total absorbé par les parois après réflexions par elles-mêmes, ces inter-réflexions étant calculées par deux méthodes différentes que sont la méthode des radiosités (implémentée dans Solene) et la méthode des enceintes fictives.

Les résultats de ces calculs effectués pour la journée du 21 juin sont illustrés par la figure II.5. On observe qu'une grande part de l'éclairement incident n'est pas absorbée par les parois mais réfléchi vers l'extérieur de la rue. Ceci est lié à la faible l'absorptivité solaire¹⁴ de ces parois, qui dans le cas étudié est de 0.2. Cette caractéristique peut se retrouver fréquemment dans les projets de construction, étant donné qu'une absorptivité solaire de 0.2 correspond à une façade de couleur grise.

Sans inter-réflexion solaire, les parois étudiées devraient absorber 20 % de la quantité d'énergie solaire qu'elles reçoivent car elles ont une absorptivité solaire de 0.2. Cependant, la figure II.5 montre que la part de l'éclairement solaire incident absorbé par ces parois est largement supérieure à 20 %. Ceci souligne l'importance de la prise en compte des inter-réflexions pour déterminer correctement l'énergie totale absorbée par les parois, qui va influencer leur bilan énergétique.

En ce qui concerne les effets des flux de chaleur par rayonnement infrarouge (GLO), en 2015 Malys *et al.* [118] les ont comparés à ceux des flux de chaleur par convection, sur les besoins de

13. Page 56, Emmanuel Bozonnet : *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon*. Thèse de doctorat, Génie Civil. La Rochelle : Université de la Rochelle, 2005.

14. L'absorptivité solaire d'un matériau est le rapport entre le flux solaire qu'il absorbe et le flux solaire qu'il reçoit.

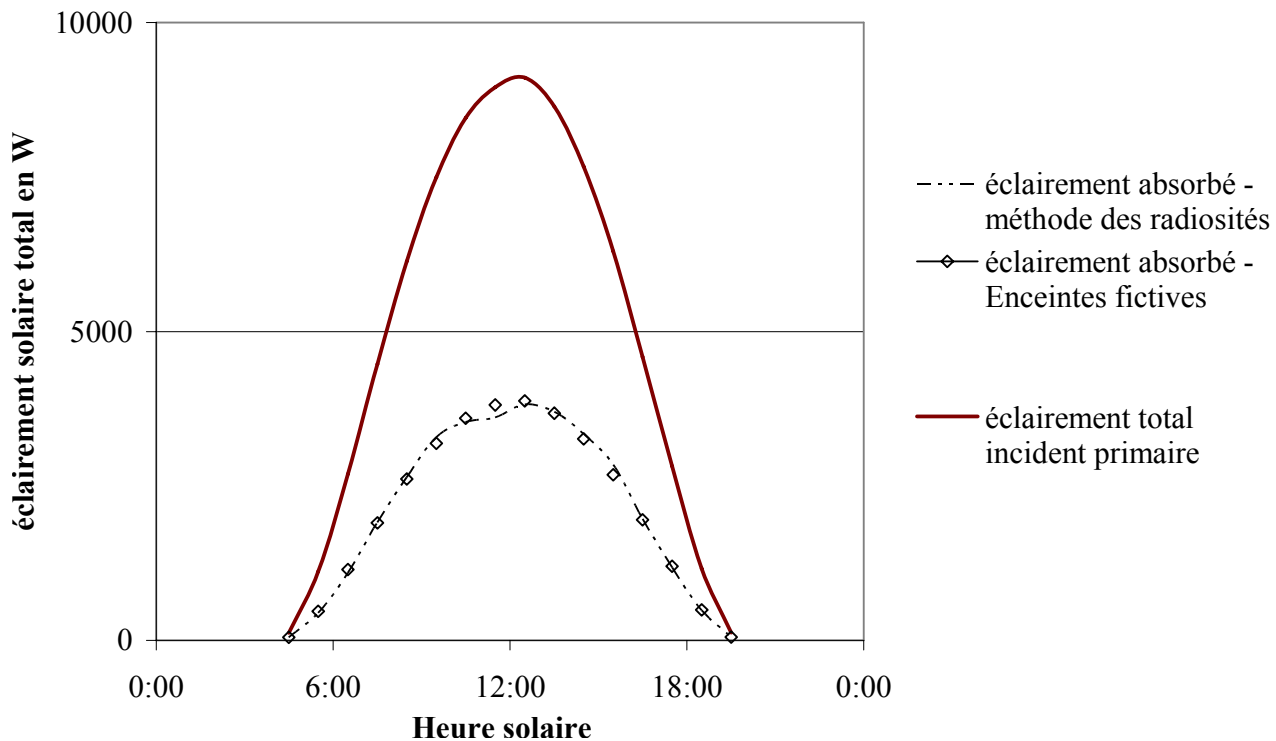


Figure II.5 – Eclairement des parois incident total et absorbé après inter-réflexions - d'après Bozonnet, 2005 [80].

chauffage d'un bâtiment non isolé et placé dans un environnement urbain dense. Les résultats obtenus les ont amenés à conseiller de modéliser en priorité les échanges GLO, aussi bien avec la voûte céleste qu'avec les surfaces construites environnantes, car ils ont un impact plus important sur le comportement énergétique du bâtiment que les flux convectifs.

Cette publication comprend une deuxième partie traitant de la prise en compte des effets du vent et de la distribution des températures d'air autour du bâtiment, dans différentes situations (bâtiment isolé ou non, période estivale ou hivernale). Il en ressort que parmi ces effets, seul l'impact de la distribution des températures d'air autour d'un bâtiment non isolé en été n'est pas négligeable. Par ailleurs, les auteurs soulignent que le modèle développé nécessite certaines améliorations avant de pouvoir être utilisé pour conseiller les concepteurs de bâtiments.

2.2.2 Adaptation des modèles au degré de connaissance des bâtiments

Lors de la conception d'un nouveau bâtiment, si un outil de STD est utilisé, il peut être alimenté avec des informations plus ou moins précises selon l'état d'avancement du processus de conception. Comme le rappelle Gholipour dans sa thèse [119], en France dans un projet de construction la conception architecturale comprend quatre étapes : l'esquisse, l'avant projet sommaire (APS), l'avant projet définitif (APD) et une dernière étape regroupant l'étude de projet et le dossier de consultation des entreprises (PRO et DCE). Par ailleurs, on peut regrouper ces étapes par niveau de développement (ND), organisation inspirée des LOD¹⁵ - *Levels Of Developpement* - américains. Chaque niveau définit le niveau de détail attendu pour les éléments qui constituent une maquette

15. www.bimforum.org/lod.

numérique de bâtiment selon l'avancement du projet. La phase esquisse correspond alors au ND1 (LOD100), l'APS au ND2 (LOD200) et le ND3 (LOD300) regroupe APD, PRO et DCE [120].

En phase esquisse l'architecte fait certains choix comme l'emplacement du bâtiment, son orientation et sa forme. Les caractéristiques constructives du bâtiment sont abordées pendant la phase d'APS, qui porte aussi sur le choix des principaux matériaux et la distribution des espaces. Lors de la phase d'APD, les réflexions menées pendant la phase d'APS sont affinées et complétées. Enfin, au cours des étapes PRO et DCE, des études techniques sont réalisées sur les solutions proposées et des entreprises sont consultées pour les mettre en œuvre. De nombreux travaux [61, 111, 116, 119] insistent sur l'importance de la phase amont de conception pour assister efficacement les concepteurs dans leurs choix. Cette phase amont regroupe l'esquisse et l'APS [116, 119]. L'outil d'aide à la conception de projets de densification urbaine dont il est question dans cette thèse vise cette phase du processus de conception.

Même en se cantonnant à la phase amont de conception, de nombreuses données peuvent être fournies par les concepteurs pour modéliser et simuler le bâtiment à construire. Nous avons vu précédemment que pour estimer les performances d'un projet de densification urbaine, il est important d'évaluer le bilan énergétique de l'environnement urbain de ce nouveau bâtiment. Or, s'il est relativement facile d'obtenir les dimensions de l'enveloppe extérieure des bâtiments existants, les données sur leurs caractéristiques constructives ne sont pas forcément accessibles, voire inexistantes pour les plus anciens. Des scénarios relatifs aux usages prévus du bâtiment neuf peuvent aussi être implémentés, même si ceux-ci ne correspondront pas à la réalité. En revanche, il peut être particulièrement ardu d'obtenir des informations sur l'usage de tous les bâtiments existants. De plus, l'équipe chargée de prendre les décisions relatives à la construction du nouveau bâtiment souhaitera certainement connaître précisément son comportement énergétique, or les résultats de la simulation d'un modèle trop simplifié risquent de ne pas répondre à ces attentes. On se place donc dans un contexte particulier où l'on veut modéliser et simuler simultanément le nouveau bâtiment et les bâtiments existants pour prendre en compte leurs interactions et fournir des conseils pertinents, tout en sachant que la quantité et la qualité des données disponibles de chaque côté risquent d'être très inégales. Un équilibre est à trouver pour adapter la complexité des modèles au degré de connaissance sur le problème posé, tout en gardant en tête qu'augmenter cette complexité n'est pas forcément un gage d'augmentation de la fiabilité des résultats. En effet, dans le cas des modèles de bâtiment, « une plus grande complexité peut entraîner un surcroît d'incertitudes et, éventuellement, des biais plus importants »¹⁶.

16. Page 187, Fabio Munaretto dans l'ouvrage coordonné par Bruno Peuportier : *Énergétique des bâtiments et simulation thermique*. Eyrolles, 2016, 446 p.

3 Positionnement des outils existants vis-à-vis du besoin exprimé △

3.1 Outils de STD existants et usages courants

3.1.1 Pleiades+COMFIE

3.1.1. i) STD à l'échelle du bâtiment

P+C a initialement été conçu pour réaliser des études à l'échelle d'un bâtiment seul, en prenant éventuellement en compte les bâtiments alentours comme des masques solaires. P+C est particulièrement bien adapté au contexte français puisque des modules intégrés à l'environnement logiciel permettent de vérifier à la fois que les projets de construction de bâtiments neufs sont conformes à la RT2012, et que les projets de rénovation sont conformes à la réglementation thermique en vigueur pour les bâtiments existants, appelée « RT existant ». Ainsi, de nombreux exemples d'études réalisées en France avec P+C, en majorité à l'échelle d'un bâtiment, sont disponibles sur le site internet d'IZUBA énergies¹⁷.

La société française IZUBA énergies, chargée du développement et de la diffusion de P+C, a d'ailleurs utilisé cet outil pour la conception du bâtiment abritant ses nouveaux locaux, construit sur un site dégagé et livré en avril 2015. Un site internet présente le projet en détail, avec notamment une page dédiée aux mesures réalisées pendant la première année de fonctionnement¹⁸, qui montrent une bonne adéquation entre la STD et le fonctionnement réel.

3.1.1. ii) STD à l'échelle du quartier

Au fil du temps P+C a été enrichi par de nombreuses fonctionnalités, dont la possibilité de modéliser plusieurs bâtiments indépendants les uns des autres avec l'interface de modélisation graphique Alcyone. Ceci permet de réaliser simplement des études à l'échelle d'un quartier.

Ainsi, P+C a été utilisé en 2014 [92] comme outil d'aide à la conception d'un projet de construction d'une nouvelle Zone d'Aménagement Concerté (ZAC) sur le campus technologique de Savoie Technolac, au Bourget-du-Lac. La nouvelle zone d'activités, étendue sur 21 ha, représentait environ 190000 m² de surface à construire répartis entre des bureaux, des ateliers ou laboratoires et des services. Dans un souci de simplicité, on se référera ici au projet d'aménagement sous le nom de « quartier ». La démarche d'aide à la conception avait pour but de montrer à trois professionnels en charge du projet - la responsable Qualité et Développement Durable du campus, le président d'une agence d'architecture et le directeur du pôle Construction d'une société d'aménagement - comment un outil de STD pouvait leur permettre de mieux concevoir ce type de quartier.

Un plan de composition du quartier, fourni par l'agence d'architecture et importé dans Alcyone, a permis de définir facilement l'empreinte au sol des bâtiments. Ce plan faisait partie des rares

17. www.izuba.fr/societe/references/etudes1.

18. www.batiment.izuba.fr/objectifs/mesures.

informations mises à disposition par les décideurs précédemment cités, avec la définition du gabarit typique des bâtiments constituant le quartier : un édifice de quatre étages avec une base rectangulaire de 1000 m² d'emprise au sol, ce qui correspond au bâtiment en 3D de la [figure II.2](#) ([partie 2.2.1 de ce chapitre](#)). Le début du chantier n'étant pas prévu, selon les bâtiments, avant 5 à 10 ans, cette concertation se situait dans une phase très amont de conception.

Les bâtiments destinés à héberger des ateliers, laboratoires ou services ont été modélisés comme de simples masques solaires, l'aide à la conception porte donc sur les bâtiments de bureaux, soit 70 % de la surface à construire. Tous les bâtiments (quel que soit l'usage prévu) sont constitués de quatre étages identiques et leur composition d'enveloppe est celle définie pour le « bâtiment de base » dans [la partie 2.2.1](#). Les 26 bâtiments étudiés sont tous constitués d'une seule zone thermique. La [figure II.6](#) donne un aperçu du modèle du quartier représenté en 3D avec Alcyone. Les bâtiments destinés à abriter des ateliers et services (à droite et en bas de l'image, c'est à dire à l'est et au sud de la zone) sont modélisés comme des masques solaires, afin de prendre en compte les ombres portées sur les bâtiments de bureaux étudiés.

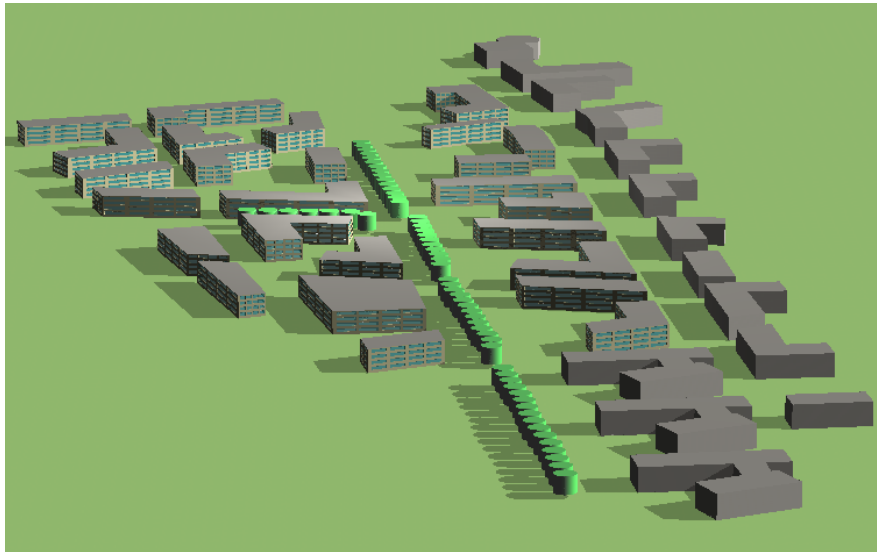


Figure II.6 – Représentation en 3D du modèle du quartier avec Alcyone - tirée de Ribault, 2014 [92].

Avant de travailler sur le quartier, de nombreux tests ont été réalisés sur le bâtiment de base et l'îlot de trois bâtiments présentés dans [la partie 2.2.1](#), pour montrer à l'équipe de décideurs comment les besoins énergétiques de ces cas d'étude simples pouvaient être impactés par des paramètres liés à l'architecture du bâtiment (orientation, forme, composition de l'enveloppe, etc) et à sa gestion (températures de consigne, apports internes, ventilation, etc).

Différentes stratégies pour diminuer la consommation électrique du bâtiment de base ont été présentées, comme le passage d'un mode constructif type BBC à un mode constructif plus proche de celui adopté pour la conception des bâtiments « passifs », ou l'utilisation d'une pompe à chaleur au lieu de radiateurs électriques pour le chauffage. Le même exercice a été réalisé en exposant cette fois des résultats de simulations effectuées sur le quartier. Une STD du quartier, composé de 26 bâtiments monozones, dure moins de 3 min.

De plus, une étude a été menée pour déterminer les possibilités offertes par l'énergie photovoltaïque pour couvrir la consommation électrique annuelle de cet ensemble de bâtiments, obtenue avec les hypothèses initiales. P+C dispose d'un module de simulation du comportement horaire de systèmes photovoltaïques, qui a été utilisé pour calculer à chaque heure de l'année la quantité d'électricité produite par des panneaux photovoltaïques couvrant 25 % de la surface de toiture de l'ensemble des bâtiments étudiés. Trois taux ont été calculés, pour chaque mois de l'année :

- le taux de couverture solaire, quotient de la production photovoltaïque mensuelle par la consommation électrique mensuelle totale, qui ne prend pas en compte la simultanéité des deux phénomènes ;
- le taux d'autoconsommation mensuelle, qui évalue la part de production consommée directement sur place en se basant sur une comparaison entre les deux grandeurs (production et consommation) à chaque heure ;
- le taux d'autoproduction mensuelle, qui évalue la part de consommation produite directement sur place en se basant également sur une comparaison entre les deux grandeurs à chaque heure.

L'évolution de ces taux mensuels au cours de l'année a été mise en perspective avec celle des valeurs mensuelles de la consommation électrique totale du quartier et de la production photovoltaïque de l'ensemble des panneaux. La [figure II.7](#) correspond au graphique présenté aux décideurs.

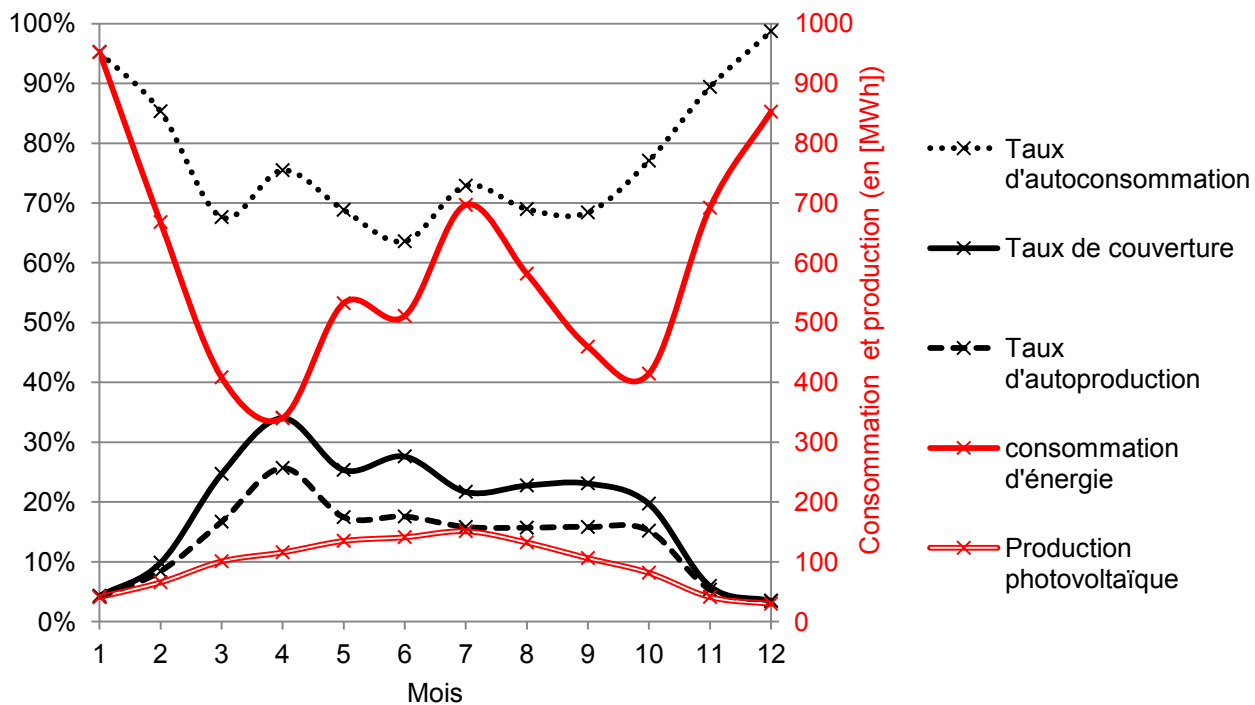


Figure II.7 – Évolution mensuelle des taux, de la consommation et de la production d'énergie - tirée de Ribault, 2014 [92].

Cette figure a été l'objet de riches échanges, notamment pour expliquer à cette équipe que le taux d'autoproduction est plus pertinent que le taux d'autoconsommation pour évaluer l'utilité de systèmes photovoltaïques pour couvrir « en direct » la consommation électrique de bâtiments. En effet, une production d'électricité photovoltaïque faible lorsque les besoins d'électricité du bâtiment

sont élevés donnera un taux d'autoconsommation élevé, tandis que pour obtenir un taux d'autoproduction élevé il faut que la production photovoltaïque soit forte lorsque la demande en électricité du bâtiment est importante. Le taux d'autoproduction peut d'une certaine façon être considéré comme un indicateur de performance bioclimatique, car il permet d'évaluer l'une des possibilités d'exploitation de la ressource solaire par le bâtiment pour couvrir ses besoins énergétiques.

Dans ce cas d'étude, P+C s'est révélé être un outil pertinent pour sensibiliser les responsables de la construction d'un quartier aux conséquences des choix qu'ils pourraient être amenés à faire en phase amont de conception. Le site internet d'IZUBA énergies mentionne d'autres études réalisées sur des ZAC avec P+C¹⁹ dans la catégorie « Analyse énergétique urbanistique », témoignant des nombreuses possibilités d'utilisation de l'outil à l'échelle quartier.

3.1.1. iii) *Optimisation multicritère*

Au cours de sa thèse soutenue en 2013 [29] et réalisée à Mines ParisTech, Rivallain a implémenté l'algorithme génétique NSGA-II dans P+C dans l'optique de réaliser des optimisations multicritères d'opérations de réhabilitations énergétiques de bâtiments existants. Les critères à minimiser sont les impacts environnementaux de l'opération de réhabilitation sur le cycle de vie du bâtiment étudié, des indicateurs financiers (coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie) et l'inconfort des occupants en été. L'espace de recherche des solutions est composé de différentes épaisseurs d'isolation des parois du bâtiment, deux types de vitrage, deux systèmes de ventilation et trois pourcentages de production d'eau chaude sanitaire par un système solaire thermique. Cette approche par algorithme génétique a notamment été enrichie par une extension à des parcs de bâtiments, mettant ainsi en évidence l'impact de la morphologie de l'environnement urbain sur les performances des programmes de réhabilitation énergétique. Ces travaux ont donc montré la possibilité d'utiliser P+C en association avec une méthode d'optimisation multiobjectif par algorithme génétique pour un outil d'aide à la décision spécifique, orienté vers les stratégies de réhabilitation énergétique et applicable à l'échelle du bâtiment comme à celle de parcs bâtis existants.

Recht a présenté en 2016 ses travaux de thèse [121] (réalisés à Mines ParisTech) au cours desquels l'algorithme génétique NSGA-II a été implémenté dans l'environnement de programmation informatique R²⁰ et couplé à une plateforme intégrant, entre autres, P+C. Les travaux de Rivallain n'ont pas été réutilisés car certaines procédures implémentées étaient spécifiques au projet étudié alors que la plateforme en question se veut générique. De plus, ce nouveau processus d'optimisation est capable d'utiliser tous les cœurs physiques²¹ du processeur d'un ordinateur pour lancer des STD en parallèle, ce qui n'était pas faisable avec l'algorithme implémenté directement dans P+C par Rivallain. La démarche proposée dans les travaux de Recht a été appliquée sur une étude de cas réel, à savoir la conception d'une maison individuelle présentant notamment un bilan énergétique positif (plus d'énergie produite que consommée) et des impacts environnementaux réduits.

19. www.izuba.fr/societe/references/etudes1?limit=4&start=4.

20. www.r-project.org.

21. Un cœur physique est une unité de calcul capable de traiter une instruction de façon autonome. Plusieurs unités de calcul peuvent être gravées au sein de la même puce, on parle alors d'un processeur « multi-cœur » qui est capable d'exécuter autant de programmes simultanément qu'il possède de cœurs.

Les masques proches correspondant aux habitations voisines ont été pris en compte. L'optimisation par algorithme génétique a porté sur le bilan énergétique de la maison, son coût de construction ainsi que les émissions de gaz à effet de serre associées au projet. L'espace de recherche des solutions est composé des possibilités de variations de paramètres discrets et continus liés aux épaisseurs d'isolation, aux menuiseries et aux équipements. Les résultats satisfaisants de l'étude ont permis de valider la pertinence technique de la démarche, mais aussi son intérêt pour les concepteurs puisque : « très concrètement, plusieurs résultats d'optimisation ont permis d'orienter l'architecte dans ses choix »²².

A la suite de cette thèse, l'équipe de la société IZUBA énergies a présenté début 2017 la partie « Optimisation STD » du module AMAPOLA²³, qui a rejoint l'ensemble logiciel Pleiades+COMFIE fin 2016. Basé sur les travaux de Recht, cet outil d'optimisation multiobjectif par algorithme génétique permet de traiter de nombreux critères comme le coût d'investissement d'un projet, son coût d'exploitation, sa consommation énergétique ou son bilan environnemental (en termes d'émissions de gaz à effet de serre). Les paramètres avec lesquels l'algorithme peut jouer portent aussi bien sur la composition de l'enveloppe du bâtiment que sur les différents systèmes qui peuvent y être installés. Nous avons vu dans la partie précédente que P+C peut être utilisé pour concevoir des quartiers, AMAPOLA peut donc être utilisé pour mener des études d'optimisation par algorithme génétique de la conception d'un ensemble de bâtiments.

3.1.1. iv) Commentaires

P+C apparaît comme étant un environnement logiciel bien adapté aux besoins des concepteurs de bâtiment. Il permet en effet de réaliser des STD annuelles rapides à l'échelle du quartier et depuis peu, il peut être utilisé pour réaliser des optimisations multicritères par algorithme génétique en évaluant des indicateurs de performances énergétique et économique. On note toutefois qu'il n'est pas possible de coupler P+C avec un algorithme génétique de façon « ouverte » car son moteur de calcul n'est pas conçu pour permettre des communications avec des outils extérieurs. L'intégration de P+C dans une méthode d'optimisation n'est réalisable que par des personnes ayant accès au cœur du logiciel, c'est à dire travaillant chez IZUBA énergies ou à Mines ParisTech. Au sujet de la performance bioclimatique du bâtiment, P+C dispose d'un module de calcul de production photovoltaïque qui permet d'estimer comment la ressource solaire peut être utilisée pour couvrir la consommation électrique des bâtiments.

En termes d'accessibilité, P+C est un outil intéressant car les interactions avec les utilisateurs sont facilitées par des interfaces soignées, aussi bien pour la modélisation graphique des bâtiments que pour leur mise en données. L'affichage des résultats de STD permet leur traitement rapide. Ces avantages se retrouvent dans le nouveau module AMAPOLA, qui est dans la même lignée que les autres modules de P+C pour la saisie des données d'entrée. Par ailleurs, lorsqu'une optimisation multicritère est lancée, son analyse peut être suivie en temps réel par l'utilisateur grâce à un affichage

22. Page 335, Thomas Recht : *Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive*. Thèse de doctorat, Énergétique et Procédés. Palaiseau : Université de recherche Paris Sciences et Lettres, 2016.

23. www.docs.izuba.fr/fr/index.php/AMAPOLA/_/Optimisation_STD.

des fronts de Pareto obtenus à chaque génération. A l'issue du processus, l'utilisateur dispose de la description des caractéristiques de chaque individu du front de Pareto de la dernière génération, avec des possibilités de classement, de tri et de filtre de ces solutions vis-à-vis des paramètres ou des objectifs de l'optimisation. Les développeurs de P+C s'efforcent donc de rendre leur outil aussi adapté que possible aux attentes des utilisateurs. Cependant, tous les modules de P+C sont payants, ce qui peut limiter son usage comme nous l'avons vu précédemment.

Par ailleurs, la façon dont les flux à l'interface bâtiment-environnement sont considérés dans P+C invite à considérer avec précaution les résultats de STD à l'échelle du quartier. Pour commencer, les effets de masques solaires sur la quantité de rayonnement CLO reçue par les parois des bâtiments sont pris en compte dans P+C, mais le rayonnement CLO réfléchi par le sol est évalué en considérant que le sol est éclairé uniformément sans tenir compte des masques solaires. De plus, dans P+C aucune réflexion CLO sur les surfaces extérieures des bâtiments n'est calculée. Les échanges GLO entre les parois des bâtiments ne sont pas non plus pris en compte.

3.1.2 EnergyPlus

3.1.2. i) STD à l'échelle du bâtiment

E+ figure parmi les outils de STD les plus répandus à travers le monde, comme l'attestent la présence de sociétés distributrices du logiciel DesignBuilder (basé sur E+) sur tous les continents²⁴ et la diversité des localisations des cas d'étude présentés dans les très nombreux (plus de 120) exemples de travaux de recherche utilisant E+ publiés entre 2009 et 2011²⁵. La majorité des travaux de cette liste concernent des études à l'échelle d'un bâtiment seul, considéré sans aucun environnement urbain. C'est aussi le cas pour la plupart des travaux faisant appel à E+ rencontrés dans la littérature.

3.1.2. ii) STD à l'échelle du quartier

Au cours des dernières années, E+ a été utilisé dans de nombreuses études à l'échelle du quartier et de la ville, et souvent couplé avec d'autres outils selon les objectifs visés. Nous avons donné quelques exemples de ces couplages dans [la partie 3.2.2 du chapitre I](#). La plupart des travaux cités ici en complément sont issus d'un état de l'art sur la modélisation énergétique urbaine, publié en 2016 par Reinhart [122].

Dans ces travaux, E+ est toujours utilisé pour modéliser et simuler le comportement énergétique d'un seul bâtiment à la fois, parfois en considérant que ce bâtiment est situé dans un environnement complètement dégagé, ce qui revient finalement à utiliser E+ à l'échelle du bâtiment. Par exemple, Duerr *et al.* [123] ont développé le logiciel SmartBuilds pour simuler les interactions entre des bâtiments et le réseau électrique, en termes de production et de consommation d'énergie. La consommation énergétique des bâtiments est évaluée avec E+ mais chaque bâtiment est simulé sé-

24. www.designbuilder.co.uk/international/resellers.

25. www.energyplus.net/references.

parément, en parallèle. Par ailleurs, Hu *et al.* [124] ont utilisé E+ pour concevoir le système de production d'énergie du quartier d'Almono de la ville de Pittsburgh (Etats-Unis). Chaque bâtiment de ce quartier a été associé à un des cinq types de bâtiments repérés par les auteurs. Ces cinq types de bâtiments ont été modélisés et simulés avec E+ et les résultats ont été utilisés pour estimer les besoins énergétiques de l'ensemble des bâtiments du quartier, par extrapolation. A plus grande échelle, Caputo *et al.* [125] ont couplé E+ avec un SIG pour évaluer les conséquences de stratégies de rénovation énergétique des bâtiments existants de la ville de Milan (Italie) sur leurs besoins énergétiques. Cet ensemble de bâtiments a été divisé en 56 groupes et chaque groupe est représenté par un bâtiment type modélisé et simulé avec E+.

Une étude similaire a été réalisée par Mastrucci *et al.* [126] sur les logements existants de la ville de Rotterdam (Pays-Bas), répartis en quatre typologies. Cette fois un contexte urbain a été associé à chaque typologie et les effets de masques provoqués par ces bâtiments ont été pris en compte pour évaluer les besoins de chauffage et le confort estival des occupants de chaque bâtiment type avec E+. Di Vincenzo *et al.* [127] ont aussi utilisé E+ en considérant des masques solaires, mais pour évaluer l'impact de leur taille et de leur disposition sur les consommations énergétiques d'un bâtiment et sur le potentiel de production de panneaux photovoltaïques installés sur son toit.

Allant plus loin dans la prise en compte du contexte urbain, Gracik *et al.* [128] ont développé une méthode pour quantifier les impacts de l'environnement urbain sur les systèmes de rafraîchissement des bâtiments en combinant E+ et OpenFOAM, un outil de CFD. E+ est utilisé pour obtenir les températures de surface du bâtiment étudié et OpenFOAM est utilisé pour calculer la température extérieure locale en prenant en compte les mouvements d'air autour du bâtiment étudié et de son environnement urbain. Le cas d'étude présenté est un îlot urbain constitué de neuf bâtiments cubiques identiques, disposés sur une grille rectangulaire. Le bâtiment central est simulé, les autres sont des masques solaires. Six densités différentes de l'îlot sont étudiées, la [figure II.8](#) illustre les cas ayant la plus forte et la plus faible densité.

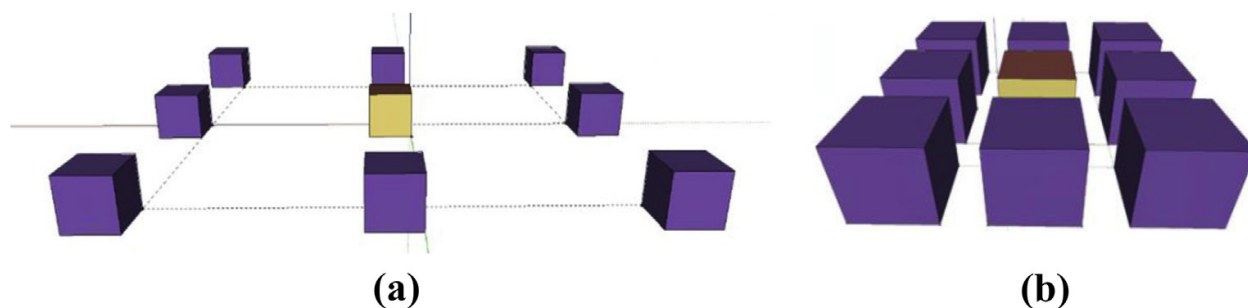


Figure II.8 – Représentation du cas d'étude, avec le bâtiment simulé au centre, pour le niveau de densité le plus faible (a) et le plus élevé (b) - tirée de Gracik *et al.*, 2015 [128].

Enfin, Bueno Unzeta [129] a présenté en 2010 une méthode de modélisation des interactions entre les bâtiments et leur environnement urbain qui repose sur un couplage entre E+ et un modèle de canopée urbaine (TEB, pour *Town Energy Balance*). La méthode est appliquée à un modèle

de canyon urbain formé de bâtiments de bureaux de quatre étages. Seul un bâtiment au centre du canyon est modélisé et simulé, les autres sont des masques solaires.

3.1.2. iii) *Optimisation multicritère*

Une étude publiée en 2014 par Nguyen *et al.* [32] montre qu'entre 2000 et 2013 E+ et TRNSYS ont été les outils de simulation de bâtiments les plus utilisés dans des études d'optimisation de la conception de bâtiments donnant lieu à des publications. Les travaux d'Evins [39] ou de Yi et Malkawi [64] sont des exemples de couplage entre E+ et un algorithme génétique pour optimiser la conception d'un bâtiment, réalisés au cours de cette période.

La popularité de cet usage d'E+ semble ne pas avoir diminué car il apparaît dans de nombreux travaux publiés après 2014. Par exemple, Brownlee et Wright [66] ont publié en 2015 une étude d'optimisation de la conception d'un étage d'un bâtiment de bureaux, utilisant E+ avec NSGA-II. Ils ont fait varier une large palette de paramètres dont l'orientation du bâtiment, le type et la surface de vitrage ou les types de matériaux de construction pour minimiser les besoins énergétiques du bâtiment et son coût de construction. La même année Ascione *et al.* [130] ont présenté une méthode d'optimisation multiobjectif basée sur un couplage entre E+ et un algorithme génétique. Les variables du problème sont des propriétés thermo-physiques de l'enveloppe d'un bâtiment et les deux critères à maximiser sont ses performances énergétiques ainsi que le confort thermique de ses occupants. Dans ces deux exemples, le bâtiment est placé dans un environnement dégagé.

De nombreux autres outils faisant appel à E+ pour la STD peuvent être utilisés pour l'optimisation de la conception de bâtiments. Le NREL, responsable du développement d'E+, a ainsi créé des outils d'optimisation utilisant son outil de STD. Par exemple, BEopt²⁶ (pour *Building Energy optimization*) est un logiciel tourné vers l'optimisation de la conception de bâtiments résidentiels à très haute performance énergétique, mais la méthode d'optimisation utilisée (méthode de recherche séquentielle) ne permet pas de traiter simultanément plusieurs objectifs. De la même façon, les chercheurs du NREL utilisent l'outil d'optimisation monocritère Opt-E-Plus pour l'aide à la conception de bâtiments commerciaux²⁷. Par ailleurs, le logiciel jEPlus²⁸, principalement utilisé pour réaliser des études paramétriques avec E+, peut être connecté à des algorithmes évolutionnaires pour conduire des études d'optimisation multicritère de la conception de bâtiments [131]. On peut aussi citer le logiciel DesignBuilder, qui comporte un module d'optimisation multiobjectif²⁹ qui utilise NSGA-II et E+. Enfin, GenOpt³⁰ est un outil d'optimisation mono-objectif générique qui peut être couplé à tout programme capable de lire des fichiers texte en entrée et de produire des résultats sous la forme de fichiers texte. On peut donc utiliser GenOpt pour réaliser des optimisations mono-objectifs avec E+.

26. BEopt - www.beopt.nrel.gov.

27. Opt-E-Plus - www.nrel.gov/tech_deployment/pdfs/45620.pdf.

28. jEPlus - www.jeplus.org.

29. Module d'optimisation de DesignBuilder - www.designbuilder.co.uk/optimisation.

30. GenOpt - www.simulationresearch.lbl.gov/GO.

3.1.2. iv) Commentaires

L'usage d'E+ comme outil d'aide à la conception de bâtiments est très répandu à travers le monde, particulièrement pour l'étude d'un bâtiment seul, sans contexte urbain. Certains travaux prennent tout de même en compte l'environnement urbain du bâtiment étudié, de façon plus ou moins fine. En revanche, même dans ces recherches qui se placent à l'échelle du quartier, la simulation des performances énergétiques ne concerne qu'un seul bâtiment.

C'est aussi le cas pour les outils d'optimisation utilisant E+ que nous avons repéré : ils ont été appliqués à un unique bâtiment placé sur un site dégagé. Certaines méthodes développées se veulent génériques et pourraient donc être appliquées à l'optimisation de la conception d'un bâtiment autour duquel on modéliserait son environnement urbain, sous forme de masques solaires ou même sous forme de bâtiments constitués de zones thermiques, dont on évaluerait aussi le comportement énergétique. Cependant, ces pistes ne semblent pas avoir fait l'objet de recherches approfondies.

Le succès d'E+ à travers le monde peut s'expliquer par le fait qu'il soit gratuit et *open source*, ce qui non seulement le rend accessible à tous mais facilite aussi son intégration dans différents logiciels ayant une interface utilisateur conviviale, comme DesignBuilder ou OpenStudio. De plus, le NREL continue ses activités de développement du cœur de calcul d'E+ et s'assure que l'outil reste au niveau de l'état de l'art des outils de STD existants. Enfin, les formats d'entrée et de sortie du logiciel sont bien adaptés à son couplage avec des algorithmes d'optimisation, comme nous le verrons dans [la partie 3.3.3 de ce chapitre](#). Ceci est certainement l'une des sources de la popularité d'E+ pour l'optimisation monocritère et multicritère de la conception de bâtiments.

Pour les professionnels souhaitant réaliser des études à l'échelle du quartier, E+ est un outil intéressant puisqu'il permet de prendre en compte à la fois les masques solaires et une réflexion CLO entre les bâtiments ainsi qu'entre le sol et chaque bâtiment comme nous l'avons mentionné dans [la partie 3.2.2 du chapitre I](#). Néanmoins, l'absence du calcul des échanges GLO entre les surfaces extérieures des bâtiments dans son bilan radiatif ne doit pas être oubliée.

3.2 Outils spécifiques pour des études à l'échelle du quartier ou de la ville

Nous avons vu dans [la partie 3.2.3 du chapitre I](#) qu'il existe des outils d'évaluation du microclimat urbain, créés spécifiquement pour quantifier les impacts des choix d'aménagement urbain. Nous avons mis en avant des problèmes de temps de calcul qui font que la plupart de ces outils ne sont pas adaptés à l'évaluation précise du comportement énergétique annuel des bâtiments d'un îlot urbain. Bien que des efforts aient été faits dans ce sens, comme pour le modèle EnviBatE, le temps nécessaire pour cette évaluation reste trop important pour envisager d'utiliser de tels outils dans une méthode d'optimisation multicritère par algorithme génétique. Par ailleurs, certains de ces outils - comme Solene-Microclimat - sont composés d'un ensemble de logiciels qui ne communiquent pas entre eux de façon automatique, ce qui empêche leur intégration dans un processus d'optimisation qui doit pouvoir lancer des simulations successives sans intervention humaine.

D'autres outils développés pour réaliser des études énergétiques urbaines permettent cette fois d'obtenir rapidement les besoins énergétiques annuels de bâtiments. C'est le cas de CitySim³¹ [132]. Successeur du logiciel SunTool [133], CitySim est un programme de simulation urbaine particulièrement complet, à mi-chemin entre les outils de STD classiques et les outils de simulation du micro-climat urbain. Il permet de simuler les flux d'énergie, d'eau et de déchets dans un contexte urbain, qui peut aller de quelques bâtiments à une ville. Il calcule de façon dynamique les consommations énergétiques des bâtiments en prenant en compte le comportement des habitants ainsi que les systèmes de ventilation, de chauffage, de refroidissement et de production d'eau chaude sanitaire. Un bilan radiatif CLO et GLO à l'échelle urbaine est réalisé [15]. CitySim est aussi doté d'une interface graphique qui facilite les interactions avec l'utilisateur. Ces caractéristiques en font un outil intéressant d'assistance à la planification urbaine. En revanche le modèle thermique utilisé pour chaque bâtiment repose sur une analogie avec un circuit électrique Résistance-Condensateur, très simplifié par rapport aux modèles utilisés dans les outils de STD précédemment cités. CitySim ne paraît donc pas être l'outil le plus adéquat pour l'aide à la conception de projets de densification urbaine dans lesquels les décideurs souhaitent avoir une modélisation fine du nouveau bâtiment. Dans la même veine, Bahu *et al.* [134] ont développé un outil de modélisation de la demande énergétique urbaine qui permet d'obtenir les besoins de chauffage annuels de milliers de bâtiments, et d'estimer l'efficacité de leur rénovation énergétique en fonction de leur année de construction. Les masques solaires sont pris en compte, mais pas les inter-réflexions CLO ni les échanges GLO entre bâtiments. Chaque bâtiment est modélisé de façon très simplifiée.

Ainsi, parmi les outils dédiés aux études énergétiques à l'échelle du quartier ou de la ville, soit le modèle thermique des bâtiments est trop simplifié pour répondre à notre problématique, soit la complexité des calculs mis en œuvre ou des relations entre les composants du logiciel empêche son utilisation dans une méthode d'optimisation multicritère par algorithme génétique.

3.3 Etude de faisabilité : optimisation d'un projet de densification avec un outil de STD

De nombreux outils d'évaluation énergétique de bâtiments ont été développés au cours des dernières années. Certains d'entre eux sont particulièrement performants dans la prise en compte des phénomènes physiques prépondérants à l'échelle du quartier, mais ils semblent peu adaptés aux besoins des utilisateurs potentiels d'un outil d'aide à la conception de projets de densification urbaine. Les outils de STD, comme P+C et E+, sont de meilleurs candidats pour répondre à ces attentes. N'ayant pas repéré dans la littérature d'étude d'optimisation d'un projet de densification urbaine mettant en œuvre un outil de STD, nous avons souhaité tester la faisabilité d'une telle démarche. Par sa pertinence pour répondre aux besoins des professionnels français, P+C est un outil intéressant. Néanmoins, le bilan radiatif simplifié intégré dans COMFIE ne permet pas une évaluation fine des interactions entre un bâtiment neuf et l'environnement urbain dans lequel il vient s'intégrer. E+ permet de réaliser un bilan radiatif plus riche, mais nous n'avons pas repéré dans la littérature de STD d'un quartier entier avec cet outil. E+ est gratuit, *open source* et certaines de

31. CitySim - www.citysim.epfl.ch.

ses caractéristiques facilitent son intégration dans une méthode d'optimisation multicritère. Nous avons donc choisi d'étudier la faisabilité de la modélisation et simulation d'un projet de densification urbaine avec cet outil, ainsi que les possibilités de couplage du modèle avec un algorithme génétique dans une perspective d'optimisation multiobjectif du projet.

3.3.1 Modélisation du cas d'étude

L'îlot urbain choisi pour cette étude est directement tiré d'un projet réalisé par des étudiants de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Versailles (ENSAV) au cours de l'année universitaire 2014/2015. Il a été effectué dans le cadre du projet MERUBBI, auquel l'ENSAV participe. Il s'agissait de concevoir le ou les bâtiment(s) à implanter sur un terrain libre au sein d'un ensemble de 19 bâtiments situé dans le quartier Ranzay de la ville de Nantes. Par rapport aux autres cas d'étude du projet MERUBBI, ce contexte urbain est considéré comme étant moyennement dense. On fait donc référence à ce projet en utilisant le nom « Nantes Moyennement Dense ». Les étudiants ont proposé d'intégrer dans l'espace libre un ensemble de deux blocs de logements de 6.8 x 22 m d'emprise au sol chacun, reliés entre eux par de grands plateaux de circulation à chaque étage. Par souci pratique on nommera ici « bâtiment 1 » le nouveau bâtiment situé du côté ouest de l'ensemble et haut de quatre étages, et « bâtiment 2 » le nouveau bâtiment situé du côté est de l'ensemble et haut de sept étages, comme indiqué sur la [figure II.9](#). Les façades et toitures de tous les bâtiments sont blanches, choix qui a été respecté lors de la modélisation présentée par la suite, à travers l'absorptivité solaire des matériaux de surface fixée à 0.1, aussi bien pour les murs extérieurs que pour les toitures.

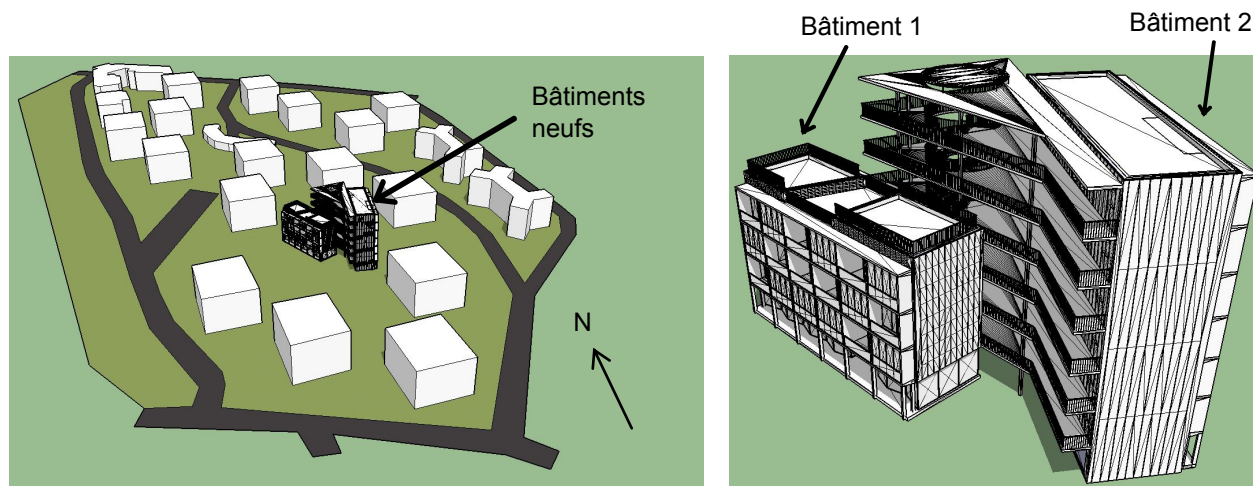


Figure II.9 – Maquettes des bâtiments neufs au sein du site (à gauche) et seuls (à droite), réalisées avec SketchUp par les étudiants de l'ENSAV.

A partir de ces maquettes et des informations fournies par l'ENSAV, nous avons tout d'abord modélisé les nouveaux bâtiments seuls (sans environnement urbain) avec le *plug-in* permettant d'intégrer OpenStudio à SketchUp. Les versions des logiciels utilisées sont SketchUp Make 2016 et OpenStudio 1.10.0, qui utilise EnergyPlus v8.4.0 pour la STD des bâtiments. Par la suite ce premier modèle sera nommé « BN » (« Bâtiments Neufs »). L'image de gauche de la [figure II.10](#) en est une illustration. Nous avons ensuite modélisé les bâtiments existants, en nous limitant aux bâtiments

les plus proches de ceux du projet pour limiter la complexité du modèle. Seuls neuf bâtiments sont conservés sur les 19 existants, ce qui porte le nombre de bâtiments étudiés à 11. Dans un premier temps, ces neuf bâtiments existants ont été modélisés sous forme de masques solaires, comme le montre l'image de droite de la [figure II.10](#). Ce modèle sera nommé « BN_M » (« Bâtiments Neufs avec Masques »).

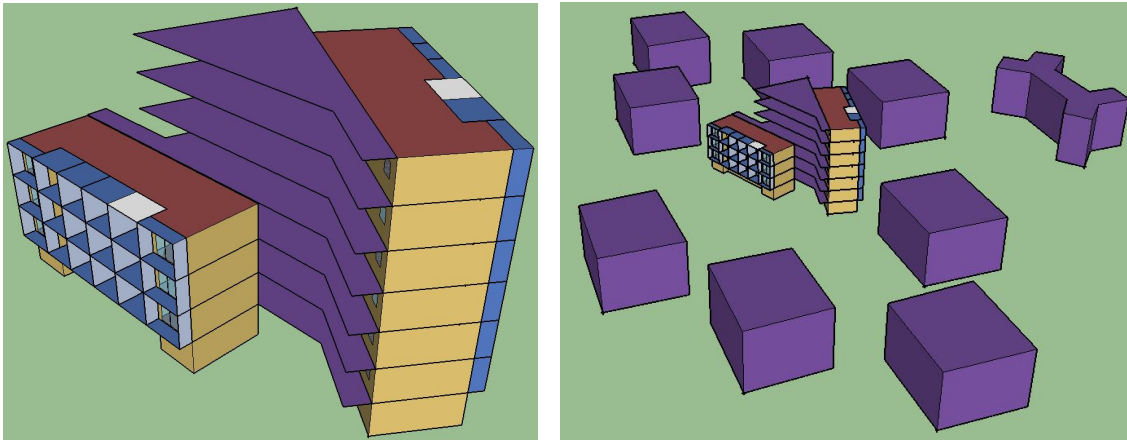


Figure II.10 – Modèles des cas BN (à gauche) et BN_M (à droite) réalisés avec le plug-in OpenStudio pour SketchUp.

Les bâtiments 1 et 2 sont en béton, isolés par l'extérieur avec 20 cm d'isolant en façade ainsi qu'en toiture et au niveau du plancher bas du premier étage, le rez-de-chaussée de chacun des deux bâtiments n'étant pas habité. Les surfaces vitrées sont composées de double vitrage avec gaz argon. La façade ouest du bâtiment 1 et la façade est du bâtiment 2 sont vitrées à 70 %. Pour conserver la forme des plateaux de circulation qui relient les deux bâtiments et constituent d'importants masques solaires, nous les avons représentés sous la forme de casquettes.

Dans un second temps, nous avons modélisé l'environnement urbain autour des nouveaux bâtiments, sous la forme de bâtiments de logements ([figure II.11](#)).

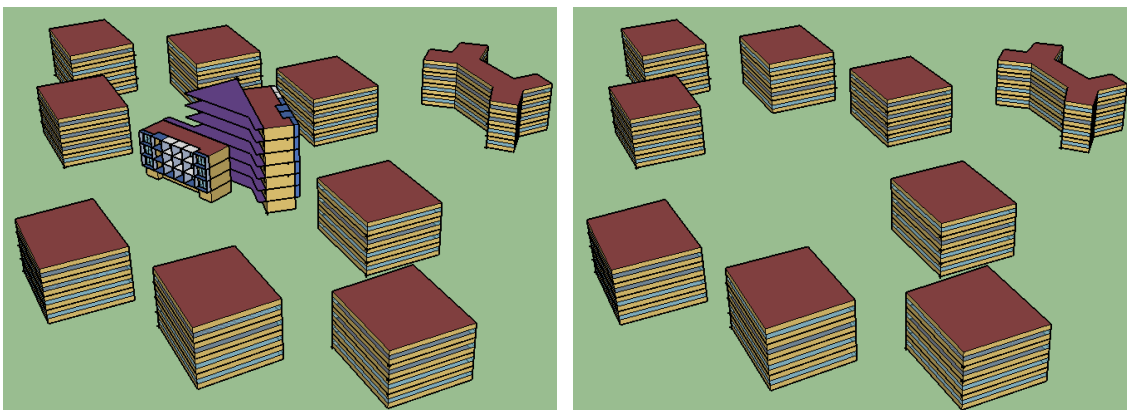


Figure II.11 – Modèles des bâtiments neufs entourés des bâtiments existants (cas BN_QE, à gauche) et des bâtiments existants seuls (cas QE, à droite) réalisés avec le plug-in OpenStudio pour SketchUp.

Les bâtiments de cette zone ayant bénéficié récemment d'une vaste opération de rénovation, nous avons considéré qu'ils sont eux aussi en béton avec 20 cm d'isolant sur les parois extérieures et en toiture. En revanche, le plancher bas du rez-de-chaussée de ces bâtiments, qui est habité, n'est pas

isolé. Les surfaces vitrées ont la même composition que celles des bâtiments 1 et 2, et occupent 30 % de la surface des murs extérieurs. Dans ce modèle multibâtiment que nous nommerons « BN_QE » (« Bâtiments Neufs dans le Quartier Existant »), chacun des bâtiments de l'environnement est composé de quatre étages de même hauteur et possède une zone thermique par étage. Le dernier modèle, nommé « QE » (« Quartier Existant »), correspond au modèle BN_QE dans lequel on a supprimé les bâtiments 1 et 2. Il ne contient donc plus que les bâtiments de l'environnement urbain existant. Les cas BN_QE et QE sont illustrés par la [figure II.11](#).

Cette phase a permis de tester les possibilités de modélisation offertes par le logiciel OpenStudio. Le projet OpenStudio est *open source* et développé par le NREL en collaboration avec d'autres laboratoires renommés. La prise en main du *plug-in* d'OpenStudio pour SketchUp est intuitive et la visualisation directe des objets créés en 3D permet de repérer facilement des erreurs de modélisation géométrique. En revanche, nous avons rencontré de nombreux bogues³² lors de la modélisation géométrique des bâtiments avec ce *plug-in*. Ces anomalies de fonctionnement obligent l'utilisateur à redémarrer SketchUp et peuvent se produire de très nombreuses fois dans une même journée, avec une fréquence d'apparition très aléatoire. Ceci constitue un inconvénient non négligeable, mais peut être toléré par l'utilisateur étant donné que tous les outils impliqués (SketchUp Make, OpenStudio, E+) sont gratuits.

La mise en données d'un grand nombre de bâtiments - définition de la composition des enveloppes, des scénarios d'apports internes, de chauffage, de refroidissement, d'éclairage et de ventilation - se fait dans l'interface utilisateur du logiciel OpenStudio plutôt qu'avec le *plug-in* OpenStudio pour SketchUp, plus adapté à la phase de dessin géométrique. Les allers-retours entre OpenStudio et son *plug-in* pour SketchUp se font aisément et sans perte d'information. En revanche, il est parfois nécessaire de passer par l'interface utilisateur d'E+ lors de la mise en données des modèles, par exemple pour créer un nouveau matériau qui n'existe pas dans la base de données d'OpenStudio. Une telle manœuvre doit se faire avec précaution, car certains éléments d'OpenStudio n'existent pas dans l'interface d'E+ - par exemple les *Space Types* et *Spaces* - ce qui peut se traduire par une perte d'information lorsqu'un modèle OpenStudio est exporté vers E+ puis importé depuis E+ dans OpenStudio.

3.3.2 Résultats des STD

Des STD sous E+ ont été lancées³³ à partir des modèles des quatre cas afin d'évaluer les interactions entre les bâtiments à concevoir d'un projet de densification et l'environnement urbain existant. Les résultats obtenus sont des besoins annuels de chauffage et de refroidissement. La comparaison des cas BN et BN_M montre que les écarts entre les bilans énergétiques réalisés sur des bâtiments avec et sans prise en compte des bâtiments environnants ne sont pas négligeables. En effet, le passage du cas BN au cas BN_M, qui se traduit par la modélisation des bâtiments existants sous la forme de masques solaires, conduit à une augmentation des besoins de chauffage

32. Un bogue est une anomalie de fonctionnement d'un programme informatique liée à un défaut de conception, plus connue sous le nom anglais *bug*.

33. Avec un ordinateur ayant une mémoire installée de 8 Go et équipé d'un processeur Intel(R) Core(TM) i5-4310U CPU avec une fréquence de base de 2.00 GHz et une fréquence maximum de 2.6 GHz.

de 6.5 % pour le bâtiment 1 et de 1.9 % pour le bâtiment 2. Les besoins de refroidissement subissent une diminution de 8.7 % pour le bâtiment 1 et 3.6 % pour le bâtiment 2. Le temps de simulation augmente peu entre les deux cas : 4 min 46 s pour le cas BN et 4 min 54 s pour le cas BN_M. Comme nous l'avons vu précédemment, cette importance de la prise en compte de l'environnement urbain lors de l'évaluation du bilan énergétique des bâtiments a déjà été soulignée par de nombreux travaux. On note ici qu'E+ permet de quantifier cet impact du contexte urbain sur la performance énergétique des bâtiments sans augmenter significativement le temps de calcul.

Le passage du cas BN_M au cas BN_QE consiste en une modélisation plus fine des bâtiments existants, qui passent d'une représentation sous forme de masques solaires à une représentation sous forme de bâtiments avec une zone thermique par étage, qui sont chauffés et refroidis comme les bâtiments neufs. Cette modification provoque une forte augmentation du temps de calcul nécessaire pour la STD du modèle, qui passe de 4 min 54 s pour BN_M à 17 min 54 s pour BN_QE. Les besoins énergétiques obtenus pour les nouveaux bâtiments sont identiques dans les deux cas. Ce résultat n'est pas surprenant : les réflexions solaires entre bâtiments sont certes modifiées par le fait que les façades extérieures des bâtiments existants ne sont plus considérées comme totalement opaques, mais leur pourcentage de surface vitrée n'est que de 30 % et surtout, aucune paroi d'un bâtiment existant ne fait directement face à une paroi vitrée d'un bâtiment neuf. De plus, dans le cas BN_QE les bâtiments existants émettent un rayonnement GLO vers l'extérieur différent de celui émis dans le cas BN_M car leur température intérieure est maintenant régulée, mais les échanges radiatifs GLO entre les surfaces extérieures des bâtiments ne sont pas pris en compte dans E+. Ainsi, le bilan radiatif GLO des nouveaux bâtiments n'est pas modifié lors du passage du cas BN_M au cas BN_QE.

Dans ce cas d'étude, le bilan énergétique des bâtiments neufs n'est pas impacté par l'augmentation de la précision de la modélisation du contexte urbain, mais le temps de calcul augmente considérablement. Si l'objectif est uniquement d'évaluer précisément le bilan énergétique des bâtiments neufs en prenant en compte les bâtiments voisins, il semble donc préférable de modéliser ces derniers comme de simples masques solaires. En revanche, l'affectation de zones thermiques aux bâtiments de l'environnement urbain permet d'estimer l'impact de la densification sur leur bilan énergétique. En comparant les résultats des STD réalisées pour les cas BN_QE et QE, on observe que l'implantation des bâtiments 1 et 2 provoque une augmentation de 1.4 % des besoins de chauffage totaux des bâtiments existants, et une diminution de 2.7 % de leurs besoins de refroidissement. En inspectant les résultats pour chacun des bâtiments de l'environnement urbain, le bâtiment le plus impacté en hiver voit ses besoins de chauffage augmenter de 5.3 % et les besoins de refroidissement du bâtiment le plus touché en été diminuent de 9.1 %. L'opération de densification urbaine étudiée ici a donc une influence non négligeable sur certains bâtiments de l'îlot urbain visé par le projet. Un outil de STD comme E+ permet de quantifier cette influence, notamment en termes de modification de la performance énergétique de ces bâtiments. Néanmoins, pour évaluer les impacts de l'opération de densification de façon plus complète, il faudrait prendre en compte plus d'une réflexion CLO entre toutes les surfaces extérieures de la scène urbaine. Il faudrait aussi estimer

précisément comment l'implantation des nouveaux bâtiments modifie les échanges radiatifs GLO et l'aérodynamique urbaine.

3.3.3 Optimisation multicritère

3.3.3. i) Test sur un bâtiment simple

Pour tester l'intégration d'E+ dans une méthode d'optimisation multicritère nous avons tout d'abord défini un cas d'étude simple afin de limiter les temps de simulation et de pouvoir tester rapidement le processus d'optimisation. Il s'agit de minimiser les consommations énergétiques d'une pièce de bureau longue de 5.4 m, large de 3.7 m et haute de 3.5 m, constituée d'une seule zone thermique et dont la seule paroi déperditive est la façade sud légèrement isolée (8 cm d'isolant). Les variables du problème d'optimisation concernent cette façade et sont la position et la taille de la surface vitrée ainsi que d'une casquette horizontale.

Nous avons choisi de coupler E+ avec l'algorithme génétique NSGA-II, car ce dernier est le plus utilisé pour résoudre des problèmes multiobjectifs et il permet à la fois de bien explorer l'espace de recherche des solutions et d'aboutir à une population d'individus performants vis-à-vis des objectifs fixés. La popularité de NSGA-II fait qu'il a été codé en plusieurs langages de programmation informatique. Nous avons opté pour l'algorithme NSGA-II codé en langage Python³⁴ au sein de l'environnement DEAP [135]³⁵, développé depuis 2009 à l'Université Laval, au Canada. Python et DEAP sont tous deux développés sous des licences *open source*.

Le choix d'un algorithme codé en langage Python a été influencé par le fait que Python répond bien à notre besoin d'un outil générique de pilotage de logiciels spécialisés, qui permette à la fois d'automatiser le lancement de STD et le traitement des résultats ainsi que de modifier des paramètres du modèle étudié. Pour le couplage d'E+ avec l'algorithme NSGA-II de DEAP, la bibliothèque « Eppy » de Python contient une classe « IDF » qui permet de lire et modifier un fichier IDF (*Input Data File*), qui est le format de fichier utilisé par E+ pour décrire un modèle de bâtiment. Python contient aussi des fonctions qui permettent de lire et modifier des fichiers CSV (*Comma Separated Values*), or à l'issue de chaque STD E+ génère automatiquement un fichier CSV qui contient les résultats de la simulation. Dans cette méthode, tout le processus d'optimisation est donc piloté par des scripts³⁶ Python. Un premier script contient l'algorithme NSGA-II, qui permet d'effectuer toutes les étapes décrites dans la partie 2.2 du chapitre I. Au cours du processus d'optimisation, l'évaluation de chaque nouvel individu de chaque population passe par une STD avec E+. Les résultats de cette STD doivent être récupérés pour évaluer les performances de l'individu. Lorsqu'un nouvel individu est créé pendant la phase de reproduction, la prise en compte de ses nouvelles caractéristiques nécessite la création d'un nouveau modèle E+, c'est à dire un nouveau fichier IDF. Toutes ces actions sont effectuées grâce à un deuxième script Python, qui utilise la bibliothèque Eppy.

34. Python - www.python.org.

35. DEAP, *Distributed Evolutionary Algorithms in Python* - www.deap.readthedocs.io.

36. En langage informatique, un script est un programme constitué d'une suite de commandes dispensant l'utilisateur de les saisir, et permettant d'effectuer une fonction particulière ou de contribuer à l'exécution d'un autre programme.

Afin de pouvoir présenter les résultats sous forme de fronts de Pareto, on se limite à deux objectifs à minimiser : la somme des besoins de refroidissement et d'éclairage annuels d'un côté, les besoins annuels de chauffage de l'autre. La figure II.12 présente un exemple de résultats de ce processus d'optimisation obtenus avec une population de 80 individus après 100 générations. Dans ce cas simple, une STD du bâtiment étudié prend une dizaine de secondes. Pour évaluer 80 individus au cours de 100 générations il faut effectuer 8000 STD, ce qui représente plus de 22 h de calcul.

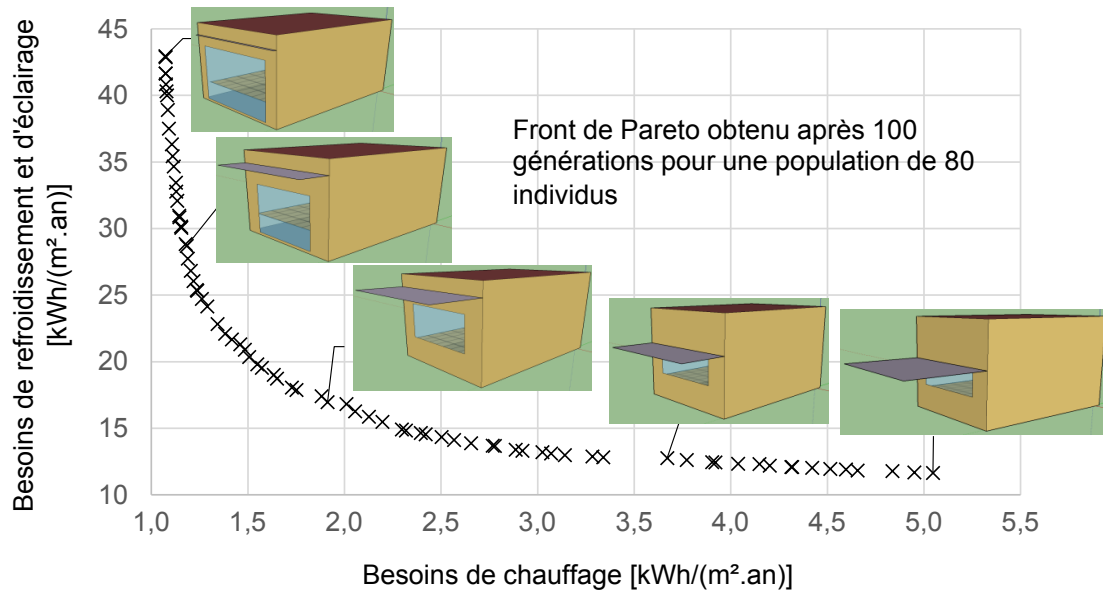


Figure II.12 – Résultats obtenus pour la minimisation des besoins énergétiques d'une pièce de bureau.

Toutes les solutions obtenues sont quasi-optimales vis-à-vis des objectifs fixés. La diversité des solutions obtenues permet de laisser un réel choix à l'équipe de conception du projet, tout en leur fournissant des informations concrètes sur les conséquences de leurs décisions. On observe ici que la solution qui permet d'obtenir les besoins de chauffage les plus faibles est celle pour laquelle la surface vitrée au sud est la plus grande, et la casquette est quasi inexistante. Cette solution permet aussi de diminuer les besoins d'éclairage artificiel car la surface vitrée est très grande, mais cette diminution est largement compensée par une forte augmentation des besoins de refroidissement. La solution qui permet de minimiser les besoins de chauffage est donc celle pour laquelle on obtient la plus forte somme des besoins de refroidissement et d'éclairage. À l'inverse, la solution qui permet d'obtenir les besoins de refroidissement et d'éclairage les plus faibles a une petite surface de vitrage et une casquette très profonde. Cette solution maximise les besoins de chauffage. Les résultats obtenus montrent aussi qu'il existe une plage de solutions pour lesquelles les valeurs des deux objectifs sont basses. Par ailleurs, l'analyse des solutions ouvre la porte à d'autres optimisations pour rendre plus exhaustive l'étude de la conception du bâtiment. On pourrait par exemple minimiser d'un côté les besoins d'éclairage annuels et de l'autre ceux de chauffage ou de refroidissement, ou se focaliser sur une période précise de l'année, etc.

3.3.3. ii) *Test sur le projet « Nantes Moyennement Dense »*

Après avoir testé le couplage entre l'algorithme NSGA-II et E+ sur un bâtiment monozone, nous l'avons appliqué au projet d'insertion de deux bâtiments neufs dans l'îlot urbain présenté précédemment, afin de voir comment cette méthode d'optimisation peut aider à la conception d'un projet de densification urbaine.

Dans ce projet, nous avons modélisé les nouveaux bâtiments de façon précise pour qu'ils soient aussi fidèles que possible aux maquettes SketchUp fournies par les étudiants de l'ENSAV. Ainsi, 72 surfaces vitrées ont été modélisées sur le bâtiment 1 et 138 sur le bâtiment 2. L'optimisation des dimensions des surfaces vitrées de ces bâtiments nécessiterait donc la modification d'un très grand nombre de paramètres du modèle. On touche ici du doigt un point qui exige une certaine vigilance sur le degré de finesse de la modélisation : si certains éléments constitutifs d'un bâtiment sont modélisés de façon très précise, cela risque de compliquer l'interfaçage entre l'algorithme d'optimisation et l'outil de STD. Dans le cas présent, nous nous plaçons dans un contexte d'étude de faisabilité sans attente particulière de la part d'une équipe de conception. Nous avons donc choisi d'optimiser des caractéristiques des bâtiments neufs - l'opération de densification concerne uniquement la conception de nouveaux bâtiments, sans modification des caractéristiques des bâtiments existants - qui mettent en œuvre un petit nombre de variables aisément modifiables. Les paramètres considérés ici sont, dans l'ordre : l'absorptivité solaire du matériau de surface extérieure des murs des nouveaux bâtiments (α_{mur}), l'absorptivité solaire du matériau de surface extérieure des toitures (α_{toit}), l'épaisseur d'isolant des murs (ep_{mur}) et l'épaisseur d'isolant des toitures (ep_{toit}). Pour chaque individu mis en valeur dans les figures (II.13 et II.14), les paramètres sont présentés dans cet ordre. Les variables sont continues. Les plages de variations fixées vont de 0.1 à 0.9 pour les absorbances et de 0.01 m à 0.2 m pour les épaisseurs d'isolant.

La première optimisation est réalisée en prenant pour objectifs la minimisation des besoins de refroidissement et de chauffage des bâtiments à concevoir. Comme les besoins énergétiques des bâtiments existants ne sont pas pris en compte, le modèle utilisé pour la STD est celui du cas BN_M (bâtiments neufs entourés des bâtiments existants modélisés comme des masques solaires). Une population de 32 individus est considérée et le processus d'optimisation est stoppé à la vingt-cinquième génération. Le front de Pareto de la population obtenue à l'issue de cette dernière génération est présenté sur la [figure II.13](#).

Comme dans le cas du bâtiment monozone, les performances des individus de la dernière population obtenue sont très diversifiées : les besoins de chauffage vont de 35 à 85 kWh/(m².an) et ceux de refroidissement varient entre 12 et 35 kWh/(m².an). Les valeurs de chaque paramètre prises par les individus couvrent bien leur plage de variation, ce qui témoigne d'une bonne exploration de l'espace de recherche des solutions. Une STD du cas BN_M est réalisée avec E+ en environ 5 min. Pour évaluer 32 individus au cours de 25 générations il faut effectuer 800 STD, ce qui représente plus de 66 h de calcul.

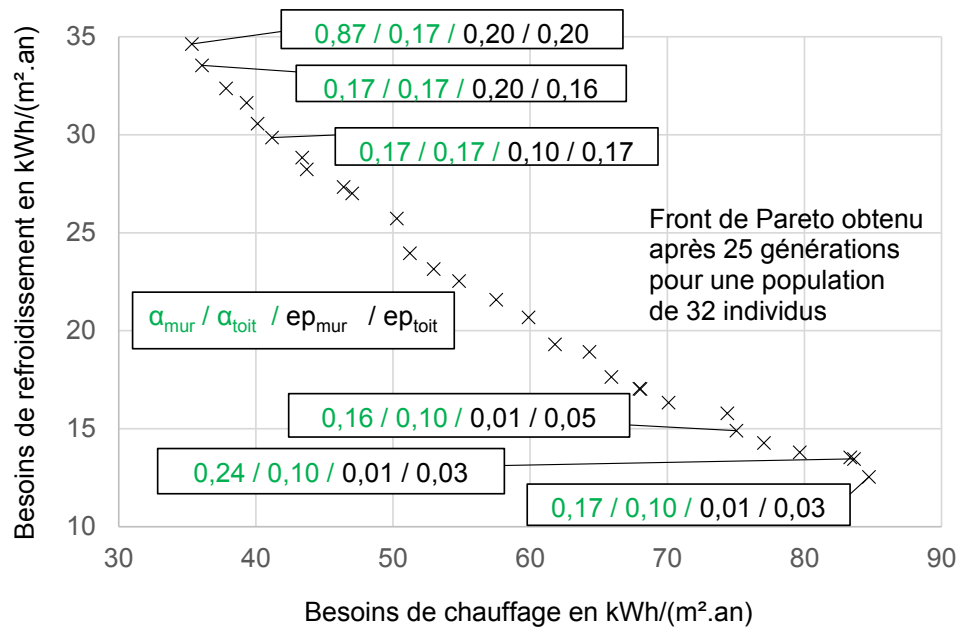


Figure II.13 – Résultats obtenus pour la minimisation des besoins de chauffage et de refroidissement des bâtiments neufs du cas BN_M.

Nous avons effectué une seconde optimisation, cette fois en prenant comme critères d'un côté les besoins énergétiques de l'îlot (somme des besoins de chauffage et de refroidissement de tous les bâtiments existants) et de l'autre les besoins énergétiques des bâtiments neufs (somme de leurs besoins de chauffage et de refroidissement). Pour que les besoins énergétiques des bâtiments de l'environnement urbain puissent être pris en compte dans le processus d'optimisation, le modèle utilisé est celui du cas BN_QE (bâtiments neufs entourés des bâtiments existants modélisés avec une zone thermique par étage). Les variables du problème, le nombre d'individus par population et le nombre de générations maximum sont les mêmes que pour la première optimisation. Le front de Pareto de la population obtenue à l'issue de la vingt-cinquième génération est présenté sur la [figure II.14](#). Une STD du cas BN_QE est réalisée avec E+ en environ 18 min donc les 800 STD du processus d'optimisation se font en 240 h, soit 10 jours.

Contrairement aux résultats de la première optimisation, ceux de cette deuxième optimisation sont peu diversifiés : les besoins énergétiques des nouveaux bâtiments oscillent entre 68.07 et 68.45 kWh/(m².an) et ceux des bâtiments existants varient entre 35.45 et 35.54 kWh/(m².an). Quant aux valeurs des paramètres, elles sont identiques pour tous les individus du front de Pareto de la dernière génération, sauf pour l'absorptivité solaire du matériau de surface extérieure des murs.

L'algorithme NSGA-II fait évoluer la population pour que les individus qui la composent soient de plus en plus performants vis-à-vis des deux objectifs fixés. Cependant, si certains paramètres que NSGA-II peut faire varier n'ont pas d'influence sur un des deux objectifs, le processus d'optimisation va avoir tendance à produire des individus dont les valeurs de ces paramètres sont les meilleurs pour le seul objectif sur lesquels ils ont de l'influence.

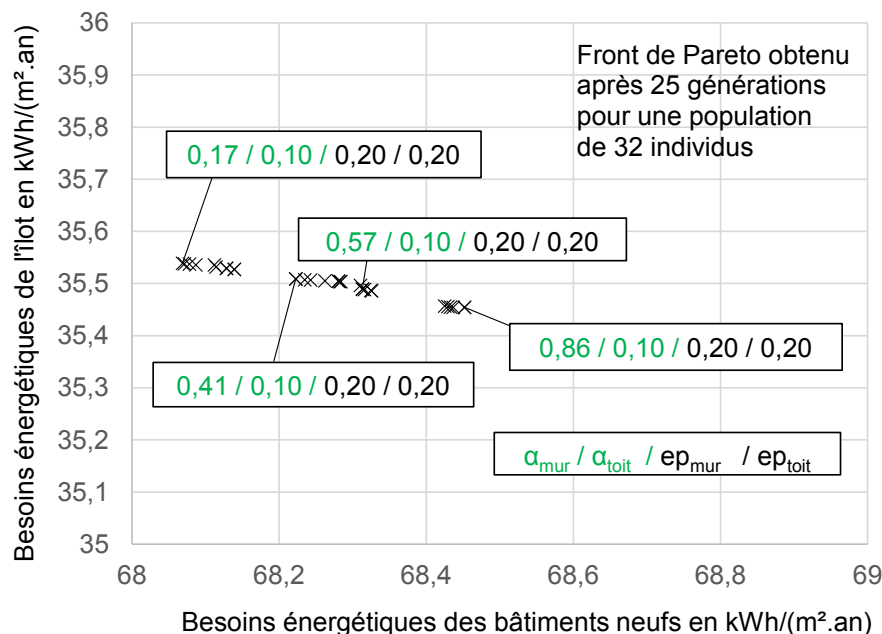


Figure II.14 – Résultats obtenus pour la minimisation des besoins énergétiques des bâtiments neufs et de ceux de l'îlot (cas BN_QE).

C'est le cas ici pour les épaisseurs d'isolant sur les murs et la toiture des bâtiments neufs. Les modifications sur ces épaisseurs impactent les déperditions thermiques de ces bâtiments, donc la quantité de rayonnement GLO qu'ils émettent vers l'extérieur et en particulier vers les surfaces des bâtiments existants. Cependant, les échanges GLO entre les surfaces extérieures des bâtiments ne sont pas pris en compte dans E+, donc la modification des épaisseurs d'isolant des bâtiments à concevoir n'a aucun impact sur le bilan énergétique de l'îlot. Les résultats présentés sur la figure II.13 montrent que pour minimiser les besoins énergétiques (somme des besoins de refroidissement et de chauffage) des nouveaux bâtiments il est préférable de minimiser leurs besoins de chauffage que ceux de refroidissement. En effet, les besoins de chauffage les plus faibles valent 35.4 kWh/(m².an) et l'individu concerné a alors des besoins de refroidissement de 34.6 kWh/(m².an), soit des besoins énergétiques de 70 kWh/(m².an). Les besoins de refroidissement les plus faibles valent 12.5 kWh/(m².an) et l'individu concerné a alors des besoins de chauffage de 84.7 kWh/(m².an), soit des besoins énergétiques de 97.2 kWh/(m².an). Or, toujours d'après les résultats présentés sur la figure II.13, l'individu ayant les besoins de chauffage les plus faibles a l'épaisseur maximum d'isolant sur ses murs et sa toiture. Ceci explique pourquoi tous les individus du front de Pareto de la dernière génération de la deuxième optimisation ont 0.2 m d'isolant sur les murs et la toiture des bâtiments neufs.

La justification de la valeur minimum de l'absorptivité solaire de la toiture prise par tous les individus du front de Pareto final de la deuxième optimisation est moins évidente. On peut tout de même faire les observations suivantes. La modification de l'absorptivité solaire des toitures des bâtiments neufs a une influence sur la quantité de flux CLO réfléchi par ces toitures vers les surfaces des autres bâtiments. Cependant, tous les bâtiments existants sont de la même hauteur que le

bâtiment 1 et plus petits que le bâtiment 2, aucun d'entre eux n'est donc impacté par la modification de cette absorptivité solaire.

Les différences de valeurs prises par l'absorptivité solaire des murs des bâtiments à concevoir chez les individus du front de Pareto final s'expliquent par la prise en compte des réflexions solaires entre bâtiments dans E+. Comme pour les toitures, la modification de l'absorptivité solaire des matériaux de surface extérieure des murs des nouveaux bâtiments impacte la quantité de flux solaire réfléchi vers les surfaces des autres bâtiments. La faible modification des besoins énergétiques de l'îlot, en valeurs relatives, provoquée par ce phénomène peut s'expliquer par le fait que la plupart des bâtiments existants sont éloignés des bâtiments neufs. Néanmoins, une faible variation des besoins énergétiques de l'îlot exprimée en kWh/(m².an) peut ne pas être négligeable lorsque l'îlot en question représente une très grande surface maintenue en température. C'est le cas ici puisque la surface totale des bâtiments existants, chauffée et refroidie, est 13985 m². Ainsi, modifier l'absorptivité solaire des murs des nouveaux bâtiments de 0.86 à 0.17 provoque une augmentation des besoins énergétiques de l'îlot de 0.09 kWh/(m².an) - passage de 35.45 à 35.54 kWh/(m².an) - ce qui représente une augmentation de 1259 kWh/an. Ceci reste modeste mais montre qu'il est important, lors de l'analyse d'une opération de densification qui impacte une grande surface de bâtiments existants, de ne pas se cantonner à l'observation des besoins énergétiques surfaciques.

3.3.4 Bilan

Cette étude a souligné la faisabilité de l'optimisation de la conception d'un projet de densification urbaine avec un outil de STD, en testant la démarche sur un cas concret : l'intégration de deux bâtiments de logements dans un quartier résidentiel de la ville de Nantes. Les logiciels utilisés - SketchUp, OpenStudio et E+ - permettent aussi bien d'évaluer l'impact de la prise en compte de l'îlot urbain sur le bilan énergétique des bâtiments neufs que d'estimer l'influence de leur implantation sur les performances énergétiques des bâtiments existants. Par ailleurs, des bibliothèques Python facilitent la mise en œuvre d'un processus d'optimisation par algorithme génétique utilisant E+. L'outil d'optimisation multicritère ainsi obtenu est uniquement composé d'outils *open source*, ce qui facilite son appropriation par différentes équipes de conception de projets de densification urbaine.

En revanche, ce travail a montré que l'absence de prise en compte des échanges GLO entre les parois extérieures des bâtiments dans E+ peut limiter la portée d'études d'optimisation de projets de densification urbaine avec la méthode testée. L'expérimentation du couplage entre l'algorithme NSGA-II et un outil de STD permettant de calculer ces échanges GLO entre bâtiments est l'étape suivante pour évaluer l'importance de cette limitation. De plus, la densité urbaine du cas d'étude sur lequel nous avons appliqué notre démarche semble être trop faible pour bien mettre en valeur certaines interactions entre les bâtiments d'un îlot urbain. Ceci pousse à mener l'expérimentation sus-citée sur un projet de densification d'un îlot urbain plus dense que le quartier nantais étudié.

Les temps de calcul présentés pour l'optimisation du projet de densification « Nantes Moyennement Dense » sont conséquents et ne paraissent pas en adéquation avec les besoins des professionnels. Cependant, l'enjeu des tests que nous venons de présenter était d'évaluer la faisabilité de la démarche

et pas de contenir les temps de calcul associés. Des réflexions autour de la diminution des temps de calcul seront développées dans le quatrième chapitre, notamment à travers la réduction de la période de simulation.

4 Positionnement du projet ANR MERUBBI



4.1 De la définition d'indicateurs de potentiel et de performance bioclimatiques...

Le projet ANR MERUBBI³⁷ (Méthode d'Exploitation des Ressources Utiles du Bâtiment Bioclimatique dans son Ilot) s'inscrit dans le programme Villes et Bâtiments Durables³⁸ (VBD). Il fait suite au projet ANR VALERIE³⁹ (VALorisation par l'Enveloppe du bâtiment des Ressources énergétiques Immédiatement Exploitable) qui faisait partie de l'édition 2008 du programme HABitat Intelligent et SOLaire photovoltaïque⁴⁰ (HABISOL). Ce projet exploratoire, dont le rapport final a été publié en 2012 [52], a cherché à apporter aux acteurs du secteur de la construction des repères clairs et simples sur deux points :

- la qualité énergétique de l'environnement d'un bâtiment, c'est à dire la capacité de l'environnement à répondre aux besoins énergétiques du bâtiment ;
- la qualité bioclimatique de certains assemblages techniques d'un bâtiment, c'est à dire leur capacité à exploiter les ressources énergétiques présentes dans l'environnement du bâtiment pour couvrir ses besoins.

Pour ce faire, les partenaires du projet VALERIE ont analysé par STD le comportement de trois bâtiments types (maison individuelle, logement collectif et bâtiment tertiaire) dans différents climats français en se concentrant sur deux besoins des bâtiments (chauffage et refroidissement) et trois ressources de l'environnement (le soleil, la voûte céleste et l'air extérieur). Au cours du projet, des indicateurs ont été définis pour évaluer d'un côté la qualité énergétique de l'environnement (indicateurs de potentiel) et de l'autre la qualité bioclimatique des bâtiments (indicateurs de performance). Les modalités de calcul de tous ces indicateurs sont détaillées dans la thèse de Chesné [10] (pp. 54-58). Ces calculs s'appuient sur une démarche initiée par Tittlein [54], qui consiste à comparer les résultats de deux simulations du même bâtiment : la première dans son environnement, la seconde dans le même environnement auquel on a retiré une ressource.

Pour mieux comprendre la méthode mise en œuvre, voyons comment est calculé un des indicateurs de performance bioclimatique développés au cours de ces travaux : le taux d'exploitation de la ressource solaire par le bâtiment pour couvrir ses besoins de chauffage annuels, que l'on notera $\tau_{expCh,s}$. Dans les explications qui suivent, nous reprenons certaines notations utilisées dans les tra-

37. www.anr-merubbi.fr.

38. www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/energie-durable/villes-et-batiments-durables.

39. www.valerie.urbicoop.eu.

40. www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/appel-detail/habitat-intelligent-et-solaire-photovoltaique-habisol-2008.

vaux de Chesné. Avant toute chose, il faut définir deux types de besoins de chauffage du bâtiment pour la ressource solaire :

- ses besoins de chauffage « résiduels » noté B_{Ch} , qui sont ses besoins de chauffage annuels obtenus par la STD classique en considérant l'environnement du bâtiment avec toutes ses ressources, dont la ressource solaire ;
- ses besoins de chauffage « réels » notés B_{Ch-s} , qui sont ses besoins de chauffage annuels obtenus par STD en considérant l'environnement du bâtiment sans la ressource solaire, c'est à dire en annulant les flux solaires directs et diffus des données météorologiques fournies en entrée du logiciel de STD.

Ces besoins sont calculés à chaque instant en puissance (en watt) avant d'être intégrés sur la période voulue (ici une année) pour donner des besoins en kilowattheure. On a donc :

$$B_{Ch} = \int_{an} b_{Ch}(t) dt \quad (\text{II.1})$$

et

$$B_{Ch-s} = \int_{an} b_{Ch-s}(t) dt \quad (\text{II.2})$$

où $b_{Ch}(t)$ et $b_{Ch-s}(t)$ sont respectivement les besoins de chauffage « résiduels » et « réels » du bâtiment calculés à chaque instant t .

Ces besoins sont utilisés pour calculer des indicateurs. Ainsi, le potentiel exploité annuel de la ressource solaire pour couvrir les besoins de chauffage du bâtiment, noté $P_{exp_{Ch,s}}$ est défini comme le flux solaire effectivement utilisé sur l'année (en kilowattheure) pour répondre aux besoins de chauffage du bâtiment. Il se calcule de la façon suivante :

$$P_{exp_{Ch,s}} = \int_{an} p_{exp_{Ch,s}}(t) dt \quad (\text{II.3})$$

avec

$$p_{exp_{Ch,s}}(t) = b_{Ch-s}(t) - b_{Ch}(t) \quad (\text{II.4})$$

Il s'agit d'un indicateur de performance. Le potentiel concomitant de la ressource solaire pour les besoins de chauffage est un indicateur de potentiel, noté $P_{conc_{Ch,s}}$. A chaque instant t , le potentiel concomitant de la ressource solaire pour les besoins de chauffage, noté $p_{conc_{Ch,s}}(t)$ est égal au potentiel total de la ressource solaire si les besoins de chauffage « réels » existent, et nul sinon. Le potentiel total de la ressource solaire à chaque instant t est noté $p_{tot_s}(t)$ et est égal à la totalité du flux solaire (en watt) reçu à cet instant par le bâtiment. Le potentiel concomitant de la ressource solaire pour les besoins de chauffage se calcule donc de la façon suivante :

$$P_{conc_{Ch,s}} = \int_{an} p_{conc_{Ch,s}}(t) dt \quad (\text{II.5})$$

avec

$$p_{conc_{Ch,s}}(t) = \begin{cases} p_{tot_s}(t) & \text{si } b_{Ch-s}(t) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Le taux d'exploitation de la ressource solaire par le bâtiment pour couvrir ses besoins de chauffage annuels donne le pourcentage du potentiel utile de la ressource solaire effectivement exploité par le bâtiment pour couvrir ses besoins de chauffage. Il est donc défini comme le rapport entre le potentiel exploité et le potentiel concomitant de la ressource solaire :

$$\tau_{expCh,s} = \frac{P_{expCh,s}}{P_{concCh,s}} \quad (\text{II.7})$$

Les résultats du projet VALERIE ont montré que l'environnement des bâtiments constitue un important gisement énergétique mais que son exploitation par ces derniers est faible. Le rapport final du projet [52] met également en évidence que la réduction des besoins énergétiques des bâtiments par isolation thermique est une solution qui, malgré ses vertus, atteint aujourd'hui « ses limites techniques sur tous les critères sur lesquels elle a une influence »⁴¹. Une des conclusions du projet est donc que « l'avenir de la performance énergétique des bâtiments est dans l'exploitation de leur environnement »⁴². Parmi les perspectives abordées, il est proposé de s'intéresser aux méthodes numériques avancées (en particulier aux méthodes d'optimisation) pour créer de nouveaux outils facilitant la mise en œuvre de nouveaux moyens de conception sur le terrain. Pour aller encore plus loin, les membres du projet VALERIE incitent au développement d'une méthode de conception basée sur la démarche qu'ils ont défini, et dédiée aux concepteurs de bâtiments haute performance. L'accent est aussi mis sur l'importance de prendre en compte l'environnement des bâtiments lors de leur conception, car celui-ci a un fort impact sur la disponibilité et l'utilité des ressources. Enfin, les travaux menés au sein du projet VALERIE ont également porté sur les freins à la diffusion des innovations étudiées dans le projet. Ceci a abouti à la proposition d'un plan d'accompagnement de la diffusion de telles méthodes dont l'un des axes propose la création de « plateformes technologiques, multidisciplinaires, ouvertes à tous les acteurs depuis la recherche et l'enseignement et jusqu'à la mise en œuvre, dédiées à l'enveloppe du bâtiment vue comme un objet technologique à part entière »⁴².

4.2 ...à leur utilisation pour l'évaluation de projets de densification urbaine

Le projet MERUBBI a été initié en janvier 2014 pour apporter des réponses à certains besoins exprimés à l'issue du projet VALERIE et mentionnés ci-dessus. Son objectif principal est de développer une méthode de conception de bâtiments à haute performance énergétique en adéquation avec les attentes des concepteurs, intégrant la question de l'exploitation des ressources utiles de l'environnement. La dimension urbaine des projets est bien présente car les cas d'étude traités pour développer l'outil MERUBBI sont des projets d'insertion d'un bâtiment dans différents contextes : dégagé (le bâtiment neuf est seul sur sa parcelle), environnement urbain moyennement dense et

41. Page 119, Thierry Duforestel, Hassan Bouia, Lou Chesné *et al.* : *Projet HABISOL-VALERIE, Valorisation par l'enveloppe du bâtiment des ressources énergétiques immédiatement exploitables*. Rapport final. Paris : Agence Nationale de la Recherche, 2012, 177 p.

42. Page 117, *idem*.

environnement urbain très dense. La prise en compte non seulement de l'impact des bâtiments existants sur le bâtiment à concevoir mais aussi de la réciproque est un objectif clairement affiché.

Le projet MERUBBI souhaite s'ancrer dans le réel : dans les cas d'étude qui servent de support au déploiement de la méthodologie, l'îlot existant choisi est un site réel et le ou les bâtiment(s) neuf(s) sont modélisés par des étudiants en architecture. Les cas se divisent en trois types de bâtiment neuf et trois localisations différentes : la région parisienne pour la maison individuelle, Strasbourg pour le bâtiment de bureaux et Nantes pour l'immeuble de logements collectifs. Pour chaque type-localisation, les trois niveaux de densité du bâti existant cités dans le paragraphe précédent sont considérés. Il y a donc neuf cas d'étude.

Le projet MERUBBI réunit un consortium composé des acteurs suivants :

- des centres de recherche et développement en énergétique du bâtiment (EDF R&D⁴³, CEA INES⁴⁴, CETHIL⁴⁵);
- un centre de recherche sur des thèmes liés aux ambiances architecturales et urbaines, dont le microclimat urbain (CRENAU⁴⁶);
- des écoles d'architecture qui orientent et testent les développements (ENSAS⁴⁷, ENSAV⁴⁸);
- un bureau d'études en énergétique du bâtiment qui apporte ses connaissances du terrain, notamment sur les plans économique et réglementaire (BETEM⁴⁹);
- une entreprise qui possède une solide expérience en développement d'outils de modélisation performants et conformes aux attentes des professionnels du bâtiment (EnerBIM⁵⁰, fondée par les anciens gérants de la société HPC-SA, créatrice du logiciel ArchiWIZARD).

Le caractère multidisciplinaire de cette équipe facilite le développement d'une plateforme de modélisation qui est destinée, à terme, à un panel diversifié d'utilisateurs (aménageurs, architectes, bureaux d'étude, collectivités locales...). L'approche interdisciplinaire du projet MERUBBI est détaillée dans un article écrit par l'ensemble des acteurs cités ci-dessus [136].

Dans la suite de ce manuscrit, on fera référence à la plateforme MERUBBI avec le diminutif « PFM ». Au sein de la PFM, les bâtiments sont modélisés en utilisant la bibliothèque BuildSysPro open source⁵¹ et le système d'équations correspondant est résolu avec le solveur d'équations Dymola, ce qui permet d'évaluer le bilan énergétique des bâtiments par STD annuelle. Cet environnement logiciel permet de réaliser un bilan radiatif complet en prenant en compte les masques solaires, les inter-réflexions CLO (donc plusieurs réflexions) entre chaque bâtiment et les surfaces qui l'entourent ainsi que les échanges GLO entre les surfaces extérieures de chaque bâtiment, le sol, la voûte céleste

43. EDF R&D - www.edf.fr

44. CEA INES - www.ines-solaire.org/fr/recherche-innovation/energetique-batiment.

45. CETHIL - www.cethil.insa-lyon.fr.

46. CRENAU - www.aau.archi.fr/crenau.

47. ENSAS - www.strasbourg.archi.fr.

48. ENSAV - www.versailles.archi.fr.

49. BETEM - www.betem.fr.

50. EnerBIM - www.site-enerbim.rhcloud.com.

51. BuildSysPro open source est une bibliothèque *open source* développée par EDF dans la continuité de la bibliothèque BuildSysPro. Ecrite en langage Modelica, elle est dédiée à la modélisation de bâtiments, de quartiers et de systèmes énergétiques. Elle est disponible à l'adresse suivante : www.github.com/edf-enerbat/BuildSysPro.

mais aussi les surfaces extérieures des bâtiments voisins. Dymola est un outil payant, qui peut être remplacé par OpenModelica qui est un outil gratuit et *open source*. Des tests de STD des modèles de bâtiments avec OpenModelica ont été réalisés au cours du projet MERUBBI, mais certaines anomalies dans les résultats obtenus laissent penser que cet outil n'est pas encore aussi robuste que Dymola. Par ailleurs, OpenModelica utilise le solveur d'équations DASSL tandis que Dymola peut utiliser différents solveurs d'équations, dont DASSL et CVODE. Des tests de STD avec Dymola en utilisant DASSL conduisent à des temps de calcul similaires à ceux obtenus avec OpenModelica, mais les temps de calcul obtenus avec Dymola en utilisant CVODE sont beaucoup plus faibles.

La PFM intégrera à terme une méthode d'optimisation multicritère de la conception des bâtiments, par algorithme génétique. L'algorithme utilisé sera NSGA-II, provenant de la bibliothèque DEAP, présentée dans [la partie 3.3.3 de ce chapitre](#). Les objectifs à optimiser seront les performances énergétiques, bioclimatiques et économiques des projets de densification évalués.

Le fonctionnement détaillé de la PFM est présenté dans [la partie 2 du chapitre III](#), et certaines de ses évolutions - en cours ou potentielles - sont présentées dans [le chapitre IV](#).

5 Synthèse △

En première partie de ce chapitre, nous avons précisé les caractéristiques qui nous paraissent pertinentes pour un outil d'aide à la conception de projets de densification urbaine, au regard des besoins de ses utilisateurs potentiels.

Tout d'abord, il est primordial que le comportement énergétique des bâtiments soit évalué par simulation thermique dynamique (STD) sur une année entière. La prise en compte de l'impact du projet de densification sur les bâtiments existants est aussi une fonctionnalité clé. L'utilisation d'un algorithme génétique pour réaliser des optimisations multicritères du projet est un volet prometteur pour guider efficacement les concepteurs dans leurs choix, sans leur imposer une solution. Afin que la prise en compte de ces trois points ne conduise pas à un outil trop lent pour être réellement utilisé par les professionnels du bâtiment, les temps de calcul doivent être réduits autant que possible. Ensuite, parmi les objectifs du processus d'optimisation, il serait particulièrement intéressant de considérer non seulement la performance énergétique du projet, mais aussi ses performances bioclimatique et économique. L'évaluation de la performance environnementale est importante (et traitée partiellement à travers l'évaluation de la performance énergétique) mais la complexité de son implémentation dans un outil intervenant en phase amont de conception d'un projet de densification urbaine nous incite à ne pas la placer en tête de liste.

La gratuité et le caractère *open source* des briques logicielles utilisées, ainsi que l'affichage de l'évolution des populations au cours du processus d'optimisation, sont des leviers pour développer une méthode d'aide à la conception accessible pour un panel d'utilisateurs nombreux et diversifiés. Permettre à ces utilisateurs d'influer « en temps réel » sur le déroulement du processus d'optimisation est une piste pour aller vers un niveau d'interactions supérieur.

Par ailleurs, un projet de densification urbaine se place à une échelle « quartier » qui implique certaines exigences sur les caractéristiques techniques de l'outil d'aide à la conception, afin que les phénomènes physiques modélisés par ce dernier ne soient pas trop éloignés de la réalité. Nous avons ainsi souligné la prépondérance des flux solaires dans les échanges énergétiques urbains, d'où découle l'intérêt de la prise en compte non seulement des masques solaires mais aussi des inter-réflexions solaires. Dans un environnement urbain dense, il serait également intéressant d'évaluer l'impact des échanges GLO entre les surfaces extérieures du bâtiment étudié, la voûte céleste et les surfaces environnantes. Un soin particulier doit être apporté à l'adaptation du niveau de finesse des modèles au degré de connaissance des bâtiments modélisés. Il s'agit de traiter la différence de richesse des informations disponibles entre le nouveau bâtiment et les bâtiments existants sans tomber dans une simplification extrême qui risquerait de nuire au sens physique des simulations effectuées.

Nous avons rappelé en introduction de ce chapitre que nos recherches bibliographiques n'ont pas relevé d'outil d'optimisation à l'échelle du quartier permettant de prendre en compte des critères de performance bioclimatique ou économique des bâtiments optimisés. De plus aucun des travaux d'optimisation à cette échelle présents dans la littérature ne s'intéresse à l'impact de la conception des bâtiments étudiés sur les bâtiments environnants, quand ils existent car les ensembles de bâtiments neufs optimisés sont souvent considérés comme étant implantés sur un site isolé. Il n'existe donc pas d'outil possédant toutes les caractéristiques citées ci-dessus.

Partant du principe que certains logiciels peuvent avoir des capacités qui n'ont pas été totalement explorées, nous avons choisi dans la deuxième partie de ce chapitre de détailler le positionnement d'outils existants vis-à-vis du besoin que nous avons exprimé.

Les caractéristiques du logiciel Pleiades+COMFIE (P+C) en font un outil en phase avec de nombreuses attentes des concepteurs de bâtiments français : réalisation de STD annuelles rapides avec des exemples d'application à l'échelle quartier, optimisation multicritère (dont économique) par algorithme génétique à l'échelle du bâtiment ou du quartier grâce à un module intégré à P+C, facilitation de la modélisation graphique des bâtiments et de leur mise en données grâce à des interfaces graphiques adaptées. En ce qui concerne le calcul des flux à l'interface bâtiment-environnement, P+C réalise un bilan radiatif simplifié qui ne prend pas en compte les inter-réflexions CLO ni les échanges GLO entre les surfaces extérieures des bâtiments. Enfin, l'usage de P+C est limité par certaines contraintes comme son caractère payant et l'absence de possibilité de couplage avec des outils extérieurs à son environnement logiciel.

Le logiciel EnergyPlus (E+) est aussi efficace pour la réalisation de STD annuelles rapides. Très populaire pour des études à l'échelle d'un bâtiment seul, il a également été appliqué à une échelle quartier, en évaluant le comportement énergétique d'un seul bâtiment entouré de masques solaires. En outre, nous avons montré qu'il peut être utilisé pour estimer les impacts d'un projet de densification urbaine, en évaluant cette fois le bilan énergétique de tout l'îlot urbain, avant et après l'intégration du projet. E+ a été intégré dans différentes méthodes d'optimisation de la conception d'un bâtiment seul, dont certaines sont multicritères et utilisent un algorithme génétique. Étant gratuit, *open source* et bien adapté au couplage avec d'autres logiciels, E+ est un outil très

accessible. Sa prise en main est plus complexe que celle de P+C, mais son intégration dans des outils comme DesignBuilder et OpenStudio facilite la modélisation des bâtiments. Ainsi, nous avons associé E+ à l'algorithme NSGA-II codé en langage Python pour optimiser la conception d'un projet de densification urbaine modélisé avec OpenStudio. Cette étude nous a permis de mettre en avant ce qu'E+ peut apporter dans cette démarche, mais aussi de souligner ses limites : E+ ne peut prendre en compte qu'une seule réflexion CLO entre les bâtiments ainsi qu'entre chaque bâtiment et le sol, et les échanges GLO entre bâtiments ne sont pas calculés.

Il existe des outils dédiés aux études énergétiques urbaines qui réalisent un bilan radiatif complet, incluant le calcul des échanges GLO entre les surfaces extérieures des bâtiments. Certains d'entre eux permettent d'évaluer rapidement le bilan énergétique des bâtiments étudiés sur une année entière. Néanmoins, dans ces outils la modélisation de ces bâtiments nous semble trop simplifiée pour fournir des résultats assez détaillés aux concepteurs d'un bâtiment neuf ayant des attentes précises sur les performances de ce dernier.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté la démarche du projet MERUBBI, qui a pour objet le développement d'une plateforme d'optimisation multicritère (énergétique, bioclimatique et économique) des projets de densification urbaine qui prenne en compte les inter-réflexions solaires et les échanges GLO entre les bâtiments de l'îlot étudié. L'équipe multidisciplinaire du projet veille à ce que cette plateforme soit en phase avec les besoins de ses utilisateurs potentiels. Cet outil se veut ouvert et modulable. Par exemple, la STD est réalisée avec le logiciel Dymola qui est payant, mais il pourrait être remplacé par le logiciel gratuit et *open source* OpenModelica quand ce dernier sera plus robuste.

La PFM est décrite en détail dans le chapitre suivant. La pertinence de son utilisation pour l'aide à la conception d'un projet de densification d'un quartier à forte densité urbaine y est évaluée et mise en perspective par rapport aux résultats de la même étude réalisée avec P+C et E+.

Un outil adapté à notre problématique : la plateforme MERUBBI



Table des matières

1	Introduction	74
2	Description de la plateforme	74
2.1	Lecture et traduction de la maquette du projet	75
2.2	Evaluations énergétique, économique et bioclimatique	77
2.3	Optimisation multicritère	77
2.4	SOLENE-Microclimat et la plateforme MERUBBI	78
3	Evaluation multilogiciel de la densification d'un quartier à forte densité urbaine	79
3.1	Description du cas « Strasbourg Dense »	79
3.2	Modélisations géométriques	81
3.3	Mise en données des modèles	83
3.3.1	Composition de l'enveloppe des bâtiments	83
3.3.2	Charges internes	85
3.3.3	Chauffage, refroidissement et renouvellement d'air	85
3.3.4	Coefficients de transfert convectif	86
3.3.5	Echanges radiatifs CLO et détail des versions considérées	86
3.4	Evaluation de l'opération de densification	88
3.4.1	Impacts du bâtiment neuf sur les bâtiments existants	88
3.4.2	Impacts de l'environnement urbain sur le bâtiment neuf	91
3.4.3	Commentaires	95
3.5	Comparaison des résultats obtenus avec les différents outils, version 0	96
3.5.1	Besoins énergétiques du bâtiment neuf	96
3.5.2	Besoins énergétiques des bâtiments existants	97
3.5.3	Commentaires	99
3.6	Impacts de l'enrichissement des modèles, versions 0, 1a, 1b et 2	101
3.6.1	Résultats obtenus avec les différentes versions	101
3.6.2	Commentaires	109
4	Synthèse	110

1 Introduction △

Au cours du deuxième chapitre de cette thèse, nous avons détaillé les besoins des utilisateurs potentiels d'un outil d'aide à la conception des projets de densification urbaine. L'état de l'art que nous avons présenté dans le premier chapitre indique qu'il n'existe pas d'outil capable de répondre à toutes ces attentes. Nous avons donc exploré les capacités de deux logiciels de STD particulièrement populaires en France (Pleiades+COMFIE, nommé P+C dans ce manuscrit) et dans le monde (EnergyPlus, nommé E+ dans ce manuscrit) pour apporter des réponses pertinentes à ces besoins. D'après cette étude, P+C et E+ sont des candidats intéressants pour assister les concepteurs de projets de densification urbaine mais ils comportent certaines limites, relatives notamment à la modélisation des flux énergétiques à l'interface bâtiment-environnement.

Nous avons ensuite présenté l'origine et la démarche du projet ANR MERUBBI. La plateforme MERUBBI (PFM) en cours de développement a pour ambition d'être un outil d'aide à la conception des projets de densification urbaine, intégrant une méthode d'optimisation multicritère par algorithme génétique. La PFM est composée d'un ensemble de briques logicielles que nous présentons dans [la partie 2 de ce chapitre](#). Les objectifs qu'elle permettra de traiter concernent les performances énergétiques, bioclimatiques et économiques du bâtiment à construire mais aussi des bâtiments existants. Les masques solaires dus à ces bâtiments ainsi que les inter-réflexions CLO entre toutes les surfaces extérieures de l'îlot urbain seront pris en compte, tout comme les échanges GLO, non seulement entre chaque bâtiment, le sol et le ciel mais aussi entre les surfaces extérieures des bâtiments.

Afin d'estimer l'importance de la prise en compte de ces phénomènes, nous présentons dans [la partie 3 de ce chapitre](#) les résultats et la démarche d'une étude comparative menée avec P+C, E+ et la PFM. Le cas testé est un projet de densification d'un îlot à forte densité urbaine, afin de nous placer dans une situation où les impacts potentiels de l'intégration du nouveau bâtiment sont particulièrement marqués.

2 Description de la plateforme △

Il est prévu que le projet MERUBBI s'achève en avril 2018. Le projet est donc en cours et les développements de la PFM ne sont pas terminés. La description de la plateforme faite ici correspond à son état au début de l'été 2017, elle est donc amenée à évoluer.

La PFM est constituée d'un ensemble de logiciels communiquant entre eux par des fichiers d'échange basés sur des formats standards. Il ne s'agit donc pas d'un bloc monolithique mais bien d'une plateforme ouverte qui peut être enrichie et qui est adaptée à l'utilisation de logiciels ayant chacun son propre rythme d'évolution. Un composant logiciel peut être remplacé par un autre à condition qu'il soit capable de lire et de générer les fichiers d'échange à son niveau de la chaîne de calcul. La [figure III.1](#) présente de façon schématique le fonctionnement de la PFM, qui est décrit en détails dans les trois parties suivantes.

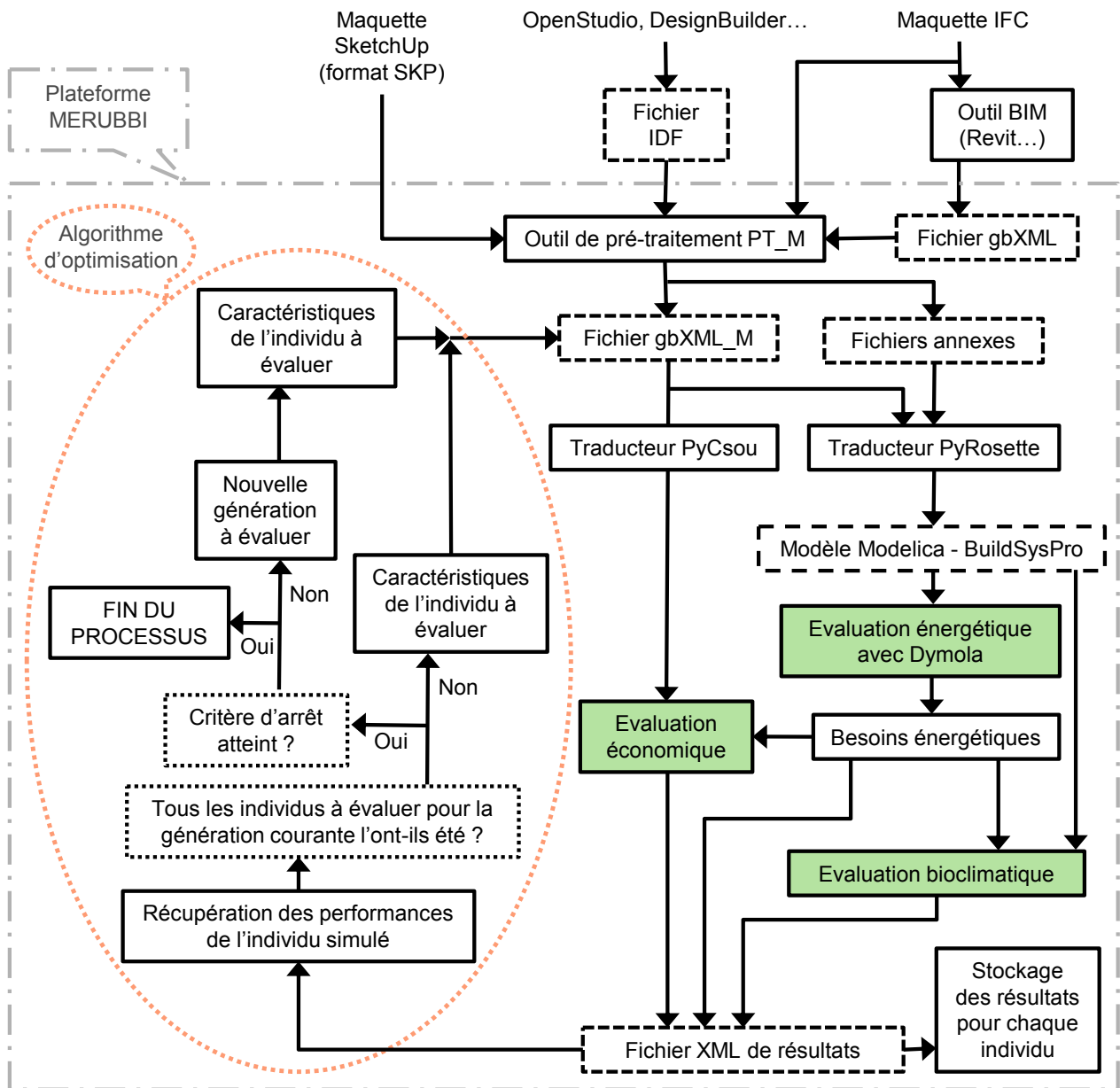


Figure III.1 – Schéma de fonctionnement de la plateforme MERUBBI.

2.1 Lecture et traduction de la maquette du projet

En entrée de la PFM on trouve tout d'abord la maquette du projet de densification urbaine (bâtiments existants et bâtiment neuf) que le concepteur souhaite optimiser. Cette maquette est lue par un outil de pré-traitement, développé par EnerBIM et que l'on nommera « cPT_M » par la suite, qui la transforme en une maquette stockée sous la forme d'un fichier basé sur le format de données standardisé gbXML¹ (ou *Green Building XML*). Quelques balises ont été ajoutées à ce fichier afin d'intégrer toute l'information nécessaire pour le fonctionnement de la PFM. Dans la suite de ce manuscrit on nommera « gbXML_M » ce fichier gbXML enrichi. Le format gbXML

1. www.gbxml.org.

est habituellement utilisé pour faire le lien entre des maquettes 3D BIM² de bâtiments et des outils de STD. Des outils BIM tels que Revit³ sont capables d'exporter des maquettes BIM en gbXML vers des outils de STD. Cependant, la représentation des bâtiments étudiés donnée par ces fichiers gbXML ne permet pas de définir complètement le modèle physique du bâtiment à simuler, notamment pour la partie « conditions aux limites » qui n'est pas implémentée dans le gbXML. PT_M permet donc de lire un fichier gbXML produit à partir d'une maquette BIM, et de le compléter pour créer un gbXML_M exploitable par un outil de STD. PT_M dispose d'une interface graphique permettant de visualiser cette maquette 3D enrichie. Par ailleurs, cet outil peut également créer un gbXML_M directement à partir d'une maquette IFC⁴ ou d'une maquette SketchUp. Il est aussi capable de traiter une maquette IDF créée avec OpenStudio, DesignBuilder ou directement avec E+.

Les possibilités d'enrichissement de la maquette d'un projet de densification par PT_M dépendent de la nature de cette maquette. Si cette dernière a été créée avec SketchUp, PT_M est capable d'identifier des zones thermiques, des parois avec leurs composants, des surfaces vitrées et des masques solaires à partir d'une maquette purement géométrique. Pour toute autre source de données (IFC, gbXML et IDF) admissible en entrée de PT_M, cet outil peut éditer les compositions des parois et des surfaces vitrées ou modifier les conditions aux limites du modèle, mais il n'est pas possible de supprimer ou ajouter une zone thermique, une paroi ou une surface vitrée. Cependant, pour ces trois formats de maquette une fonctionnalité de création de fenêtres sur les bâtiments existants est en cours d'implémentation car les architectes modélisent parfois ces bâtiments sans surface vitrée. Pour évaluer le comportement énergétique de ces bâtiments de façon plus réaliste, il est intéressant d'ajouter automatiquement des ratios de surfaces vitrées standards sur leurs parois verticales.

Par ailleurs, PT_M calcule le flux solaire incident sur chacune des parois opaques et surfaces vitrées des bâtiments étudiés, en prenant en compte les masques solaires ainsi qu'un nombre réglable d'inter-réflexions solaires sur le sol et les surfaces extérieures de tous les bâtiments modélisés. Enfin, PT_M est capable de calculer les facteurs de forme⁵ entre les parois des bâtiments étudiés, ce qui permet de réaliser un calcul précis des échanges GLO entre ces surfaces. Les flux solaires et les facteurs de forme sont calculés par lancer de rayons. Leurs valeurs sont stockées dans des fichiers annexes associés au gbXML_M, ce qui forme un ensemble de fichiers décrivant chaque bâtiment et donnant les données nécessaires au calcul des échanges radiatifs GLO et CLO entre chaque bâtiment et son environnement.

2. D'après l'association BIM France (www.bimfrance.net/glossaire/bim), le BIM est un « processus de conception et de gestion des données d'un ouvrage immobilier le long de son cycle de vie [...] ». BIM signifie « *Building Information Modeling* » et BIM France propose « *Bâti et Informations Modélisés* » comme équivalent en langue française.

3. www.autodesk.com/products/revit-family/architecture.

4. www.bimfrance.net/glossaire/ifc.

5. Dans le domaine des échanges radiatifs entre surfaces, le facteur de forme d'une surface S_2 vis à vis d'une surface S_1 est la proportion du flux total émis par S_1 et arrivant sur S_2 .

2.2 Evaluations énergétique, économique et bioclimatique

Un programme écrit en langage Python, nommé « PyRosette » et développé par EDF R&D, traduit le gbXML_M en modèle écrit en langage Modelica basé sur la bibliothèque BuildSysPro open source, bibliothèque que l'on nommera « BSP » dans la suite de ce manuscrit. La modélisation de chaque bâtiment se fait par une analogie électrique, par exemple les murs sont des circuits Résistance-Condensateur, les nœuds d'airs sont représentés par des capacités, etc. Tous les éléments sont assemblés pour constituer le modèle entier, qui est ensuite utilisé pour une évaluation énergétique par STD avec Dymola. Les flux CLO ont été pré-calculés pour chaque pas horaire de la simulation annuelle par PT_M, et sont lus dans les fichiers annexes mentionnés précédemment. Les flux GLO échangés par les parois des bâtiments avec leur environnement (dont les parois extérieures des autres bâtiments) seront calculés dans Dymola par résolution d'un système matriciel basé sur les facteurs de formes pré-calculés par PT_M et lus dans les fichiers annexes.

Le gbXML_M pourra aussi être utilisé par un deuxième traducteur, écrit en langage C⁶ et en cours de développement par le CETHIL, qui permettra d'extraire du modèle les informations nécessaires pour alimenter un outil d'évaluation économique du nouveau bâtiment basé sur des règles de calcul expertes fournies par le bureau d'études BETEM. Cet outil nommé « PyCsou » utilisera les résultats issus de l'évaluation énergétique car les consommations énergétiques du bâtiment neuf impactent son coût global.

Il sera possible d'évaluer les performances bioclimatiques du bâtiment neuf ou des bâtiments existants avec la PFM. On pourra par exemple calculer le taux d'exploitation de la ressource solaire par le nouveau bâtiment pour couvrir ses besoins de chauffage. Nous avons détaillé la méthode de calcul de ce taux dans [la partie 4.1 du chapitre II](#). Pour obtenir ce taux d'exploitation, en plus de l'évaluation énergétique « classique » décrite ci-dessus il faudra en réaliser une seconde pour laquelle on supprimera les flux solaires directs et diffus du fichier de données météorologiques utilisé. Un script Python se chargera ensuite de calculer le taux à partir des valeurs des flux solaires incidents contenues dans le gbXML_M et des besoins de chauffage obtenus à l'issue des deux STD.

2.3 Optimisation multicritère

La PFM comportera un module faisant appel aux outils décrits dans le paragraphe précédent pour réaliser des optimisations multicritères du projet de densification urbaine étudié. La méthode d'optimisation qui sera utilisée est l'algorithme génétique NSGA-II que nous avons présenté dans [la partie 2.5 du chapitre I](#), codé en langage Python (issu de la bibliothèque DEAP). L'optimisation traitera deux objectifs simultanément pour pouvoir fournir aux utilisateurs des résultats sous la forme de fronts de Pareto en deux dimensions. Il sera ainsi possible de minimiser des critères énergétiques (besoins de chauffage ou de climatisation), de minimiser des critères économiques (coût global) et de maximiser des critères bioclimatiques comme le taux d'exploitation de la ressource solaire pour couvrir les besoins de chauffage. Les critères énergétiques et bioclimatiques pourront

6. www.cprogramming.com.

concerner le bâtiment à concevoir, l'ensemble des bâtiments existants, une partie d'entre eux ou bien tous les bâtiments (neuf et existants). L'évaluation des performances économiques concerne uniquement le nouveau bâtiment.

Afin d'impliquer l'utilisateur dans le processus d'optimisation, il est prévu de lui permettre de choisir les critères qu'il souhaite optimiser. De la même façon, la future interface utilisateur de la PFM devrait permettre au concepteur du projet d'indiquer quels sont les paramètres qu'il souhaite que le processus d'optimisation fasse varier. Il est probable que certaines combinaisons de paramètres ne soient absolument pas réalistes. La mise en place d'une grille d'interdictions, prédéfinie mais personnalisable par l'utilisateur, est en cours de réflexion pour empêcher NSGA-II de retenir des individus comportant une telle combinaison. Dans ce cas, un nouvel individu sera généré par l'algorithme pour remplacer l'individu interdit.

2.4 SOLENE-Microclimat et la plateforme MERUBBI

Au sein du projet MERUBBI, le CRENAU a été sollicité pour déterminer le niveau de détail jusqu'auquel il semble nécessaire d'aller dans la modélisation pour représenter correctement les impacts de l'environnement urbain sur le bilan énergétique d'un bâtiment. L'outil qui a été utilisé pour cette étude est Solene-Microclimat, que nous avons présenté dans [la partie 3.2.3 du premier chapitre](#). A travers un couplage entre un logiciel de mécanique des fluides, un modèle thermo-radiatif et un modèle de STD, Solene-Microclimat peut être utilisé pour évaluer précisément les interactions entre un bâtiment et le microclimat urbain. Comme nous l'avons déjà mentionné, cette évaluation complexe est particulièrement chronophage. La plateforme MERUBBI ayant une vocation d'aide à la conception, l'objectif est que son utilisation soit aussi aisée que possible, et donc que les évaluations des solutions à tester se fassent dans un temps raisonnable. Dans cette optique, il est intéressant d'estimer quels sont les phénomènes physiques les plus influents, qu'il est donc important de modéliser précisément, et ceux dont la représentation peut être simplifiée sans trop fausser les résultats.

Les résultats de ces travaux sont présentés dans un article publié en 2017 par Lauzet *et al.* [137]. Les neuf cas d'étude décrits dans [la partie 4.2 du chapitre II](#) ont été utilisés. Pour chacun d'eux, les besoins de refroidissement du bâtiment neuf ont été calculés du 18 au 29 juin et ses besoins de chauffage ont été calculés du 17 au 28 décembre. Ceci a été réalisé en considérant différents niveaux de détail pour la modélisation des flux thermiques en relation avec les surfaces extérieures de ce nouveau bâtiment. Au niveau des échanges convectifs, les coefficients de transfert convectif pouvaient être constants, variables selon l'altitude considérée ou calculés à partir des vitesses de vent locales grâce au code de CFD. En ce qui concerne les échanges radiatifs, les inter-réflexions solaires pouvaient être prises en compte ou non pour la partie CLO. Pour la partie GLO le bâtiment neuf échangeait soit uniquement avec le ciel, en prenant en compte ou non les masques existants, soit avec le ciel et toutes les surfaces environnantes (dans ce cas les masques étaient pris en compte).

Les conclusions de cette étude soulignent l'importance de modéliser les échanges radiatifs CLO et GLO de façon précise pour évaluer correctement les besoins énergétiques d'un bâtiment, et ce

aussi bien en été qu'en hiver. Par exemple, la prise en compte des inter-réflexions solaires sur toutes les surfaces extérieures provoque une forte augmentation des besoins de refroidissement (entre 11 et 74 % selon les cas considérés) et une diminution des besoins de chauffage plus ou moins importante selon les cas (entre 1 et 34 %). Les résultats montrent aussi que les différences en termes de besoins énergétiques entre les calculs simplifiés et précis des échanges convectifs sont faibles. En effet, pour tous les cas étudiés l'écart relatif entre les besoins énergétiques obtenus avec les coefficients de transfert convectif constants et ceux obtenus en calculant ces coefficients par CFD est de l'ordre du pourcent, en hiver comme en été. Le recours à la mécanique des fluides numérique étant gourmand en temps de calcul, il semble donc préférable de privilégier des solutions simples à ce niveau.

3 Evaluation multilogiciel de la densification d'un quartier à forte densité urbaine

Nous présentons ici une évaluation énergétique d'un projet de densification urbaine menée avec P+C, E+ et la PFM. Les versions des logiciels utilisées sont SketchUp Make 2016, OpenStudio 1.10.0 qui utilise EnergyPlus v8.4.0 pour la STD des bâtiments, Pleiades+COMFIE 3.7.1.1 et Dymola 2016 FD01 32-bit. Les résultats présentés sont des besoins surfaciques annuels de chauffage et de refroidissement.

Il s'agissait de déterminer lequel des trois outils précités est le plus pertinent pour estimer les interactions entre un nouveau bâtiment et les bâtiments existants autour du terrain sélectionné pour son implantation. Dans cette partie, après avoir présenté le cas d'étude choisi, nous détaillons donc les résultats de l'évaluation de l'opération de densification réalisée avec chacun des trois outils, en commentant les écarts observés. Afin de compléter cette analyse des différences inter-logiciels, nous comparons ensuite les besoins énergétiques obtenus avec chacun d'entre eux par STD des modèles étudiés. Pour finir nous évaluons l'importance, en termes d'impacts sur ce bilan énergétique des bâtiments, des écarts entre les possibilités de modélisation énergétique à l'interface bâtiment-environnement offertes par les trois outils.

Le projet de densification urbaine dont il est question dans ce qui suit a fait l'objet d'une étude avec Solene-Microclimat que nous avons présentée dans [la partie 2.4 de ce chapitre](#). Cette dernière est complémentaire de l'étude que nous détaillons ici, étant donné que la période de temps considérée pour les simulations est différente et que les outils utilisés n'ont pas les mêmes capacités.

3.1 Description du cas « Strasbourg Dense »

Nous avons sélectionné pour cette étude un projet de densification urbaine réalisé par des étudiants de l'ENSAV au cours de l'année universitaire 2014/2015, en lien avec le projet MERUBBI. Le quartier choisi pour l'intégration d'un nouveau bâtiment est un ensemble de 22 bâtiments résidentiels anciens proche de la gare de la ville de Strasbourg (France). La densité urbaine de ce quartier est élevée, comme le montre la [figure III.2\(a\)](#). Les étudiants ont modélisé cet îlot urbain

de façon simplifiée avec le logiciel Rhinocéros, avant d'importer la maquette créée dans SketchUp. La [figure III.2\(b\)](#) donne un aperçu du résultat de la modélisation de ces bâtiments existants, après importation dans SketchUp.

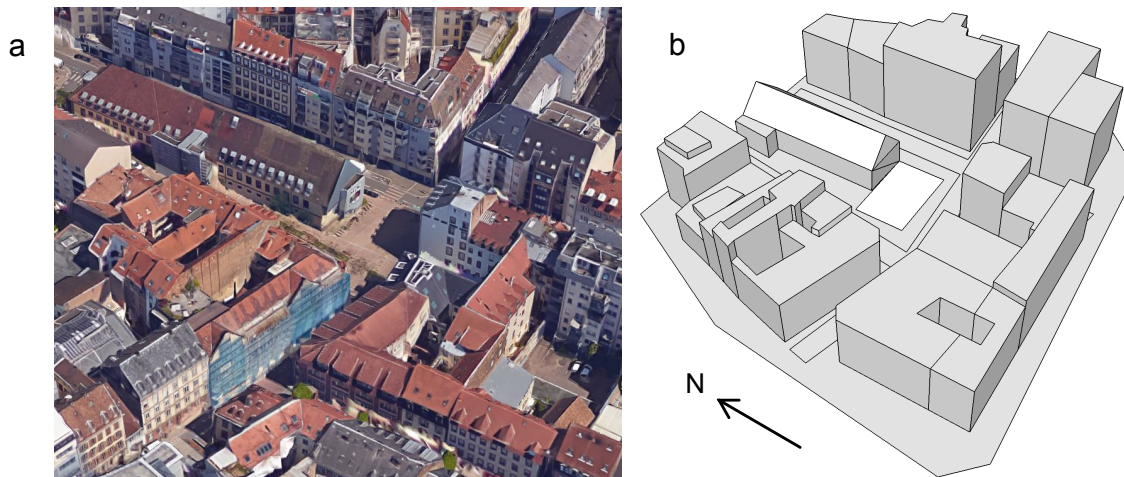


Figure III.2 – Aperçu du quartier existant avec Google Earth (a) et du quartier modélisé par les étudiants (b).

Les étudiants ont proposé d'implanter au cœur de cet îlot urbain un bâtiment dont la [figure III.3 \(a\)](#) donne un aperçu de l'allure de son modèle (réalisé avec le logiciel Rhinocéros) après importation dans SketchUp. La [figure III.3 \(b\)](#) montre le modèle complet du projet de densification, avec le nouveau bâtiment intégré dans l'îlot existant.

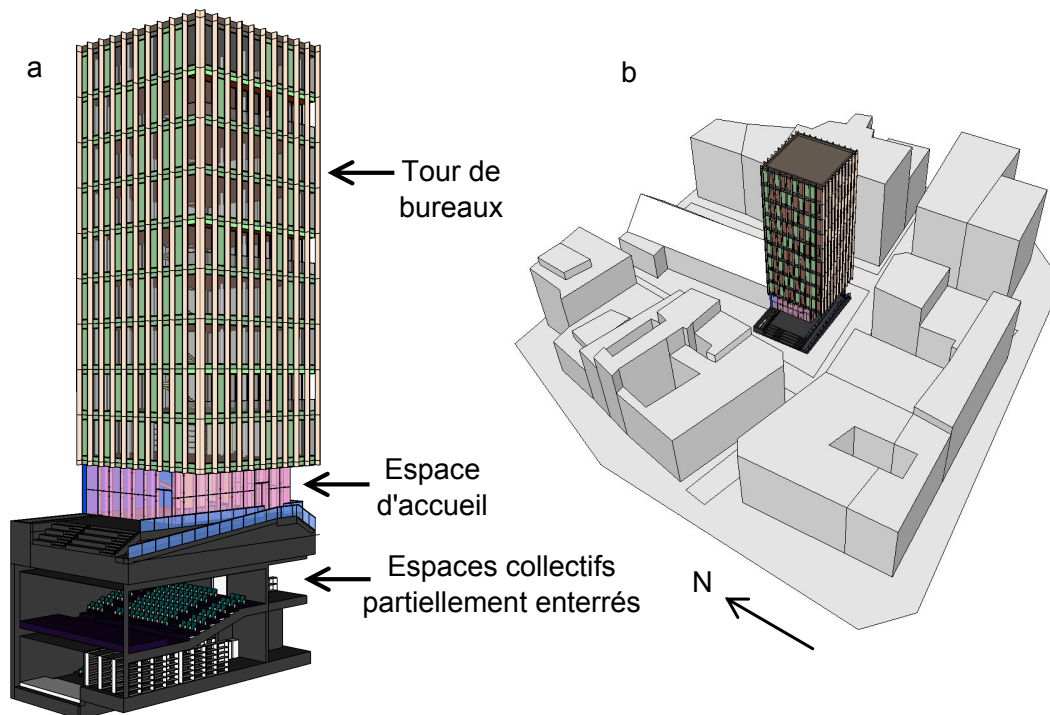


Figure III.3 – Aperçus des maquettes 3D du bâtiment neuf seul (a) et intégré dans l'îlot existant (b) après importation dans SketchUp.

Le bâtiment neuf imaginé par les élèves architectes est composé de deux entités. La première est une tour de bureaux de neuf étages de 3 m de hauteur chacun, à base carrée (13.4 m de côté), très ouverte sur l'extérieur car toutes ses façades sont très largement vitrées. Elles sont protégées des surchauffes estivales par des brise-soleil verticaux. Au deuxième, cinquième et huitième étage la façade sud est en retrait de 1.3 m par rapport à celles des étages supérieur et inférieur, ce qui forme un balcon. Pour ces trois étages, l'avancée de l'étage supérieur représente donc une protection solaire pour leur façade sud. La deuxième entité, opaque et partiellement enterrée, accueille des espaces collectifs : amphithéâtre, archives et cafétéria. Un espace d'accueil entièrement vitré et sans brise-soleil, au rez-de-chaussée du bâtiment, vient faire le lien entre les deux entités. La partie non enterrée de cet espace d'accueil est haute de 5.5 m.

3.2 Modélisations géométriques

Dans un premier temps, nous avons modélisé géométriquement les bâtiments avec le *plug-in* permettant d'intégrer OpenStudio à SketchUp. Pour simplifier notre étude, nous avons choisi de ne pas tenir compte de l'entité partiellement enterrée réunissant les espaces collectifs du bâtiment neuf. Nous avons ainsi modélisé ce bâtiment comme une tour avec un rez-de-chaussée entièrement vitré et neuf étages de bureaux. Nous avons respecté les pourcentages de vitrages définis par les étudiants pour chacune de ses façades. Pour les étages de bureaux, les ratios sont différents selon l'orientation de la façade, mais sont identiques pour tous les étages. Leurs valeurs sont les suivantes : 80 % au sud, 50 % à l'ouest, 60 % à l'est et 30 % au nord. La position et les dimensions (0.5 m de profondeur sur toute la hauteur du bâtiment, sauf au rez-de-chaussée) des brise-soleil verticaux présents sur la maquette initiale du nouveau bâtiment ont été respectées. Les étudiants avaient modélisé chaque étage de bureaux avec un grand *open space* et une petite salle de réunion. Pour réduire le nombre de zones thermiques et simplifier l'interprétation des résultats des STD, nous avons modélisé chacun de ces étages comme un *open space* occupant tout l'espace. Le bâtiment neuf est modélisé avec une zone thermique par étage.

Pour les bâtiments existants, nous avons repéré les façades munies de fenêtres et celles qui ne le sont pas avec l'outil « Street View » du site internet « Google map »⁷. Nous avons ensuite défini un pourcentage de vitrage standard de 30 % pour toutes les façades munies de fenêtres. La modélisation de ces surfaces vitrées a été facilitée par une fonctionnalité du *plug-in* d'OpenStudio pour SketchUp qui permet de créer un pourcentage de vitrage sur plusieurs surfaces à la fois. Nous avons mentionné plus haut que la création automatique de surfaces vitrées sur tous les bâtiments existants est en cours de développement dans PT_M, ce qui permettrait de s'affranchir de cette étape de la modélisation géométrique. Dans les bâtiments existants, tous les étages sont bien représentés avec des planchers intermédiaires qui les séparent, mais chaque bâtiment est modélisé avec seulement deux zones thermiques : une pour le rez-de-chaussée considéré comme un hall d'entrée qui n'est pas occupé et une regroupant tous les autres étages.

7. www.google.fr/maps.

Nous avons utilisé le *plug-in* d'OpenStudio pour SketchUp pour créer quatre modèles dont le nom et une courte description sont donnés dans le [tableau III.1](#). Les modèles ED et P sont représentés sur la [figure III.4](#), les modèles PwS et PinED sur la [figure III.5](#).

Nom du modèle	Description
ED (<i>Existing District</i>)	Quartier existant seul, sans le nouveau bâtiment
P (<i>Project</i>)	Nouveau bâtiment du projet de densification seul, sans le quartier existant
PwS (<i>Project with Shadings</i>)	Nouveau bâtiment entouré des bâtiments existants représentés comme des masques solaires
PinED (<i>Project in Existing District</i>)	Nouveau bâtiment intégré dans le quartier existant

Tableau III.1 - Noms et descriptions des quatre modèles créés.

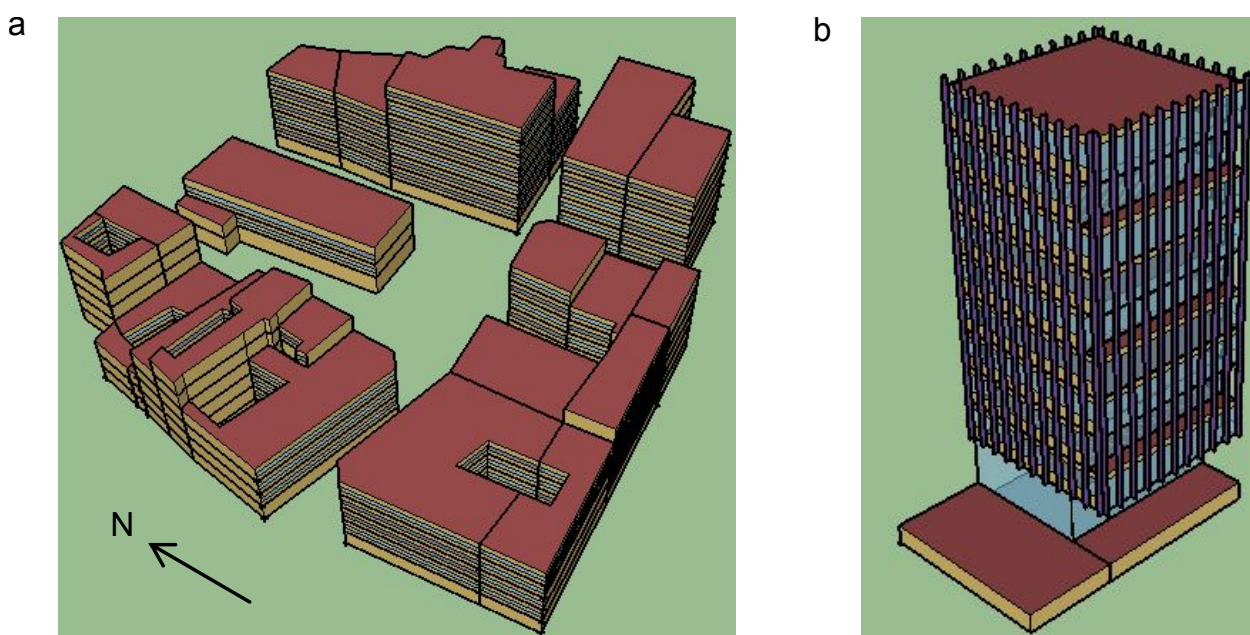


Figure III.4 - Modèles ED (a) et P (b) réalisés avec le plug-in d'OpenStudio pour SketchUp.

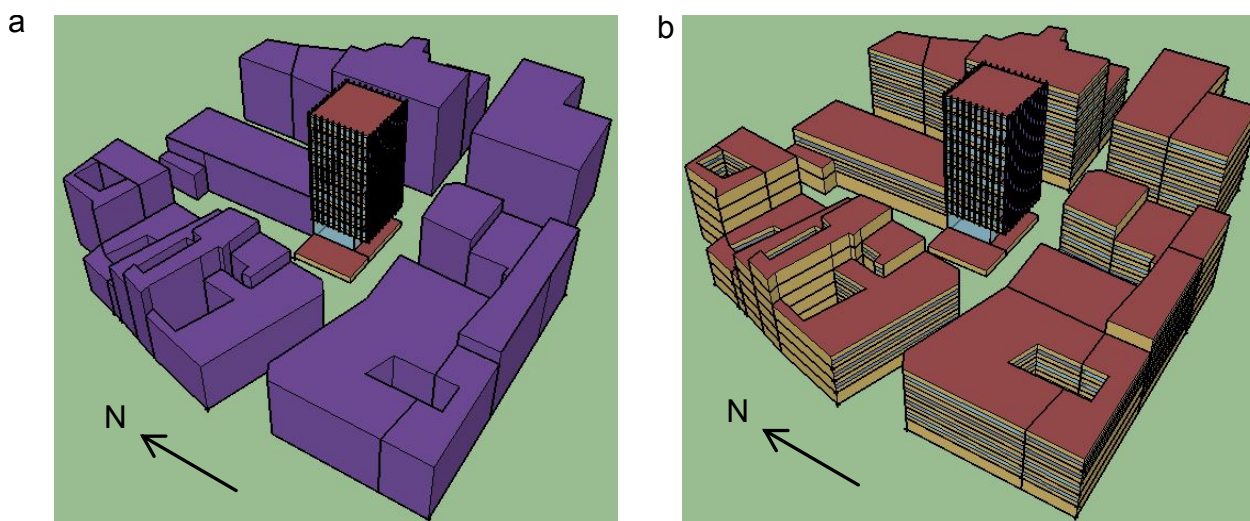


Figure III.5 - Modèles PwS (a) et PinED (b) réalisés avec le plug-in d'OpenStudio pour SketchUp.

Nous avons ensuite reproduit dans l'interface de SketchUp la géométrie de PinED, à partir du modèle créé avec le *plug-in* d'OpenStudio. Cette manipulation nous a permis d'utiliser un *plug-in* d'Alcyone (interface de modélisation 3D de P+C) pour SketchUp afin d'importer cette géométrie dans Alcyone. A partir de PinED, on obtient ED en supprimant le bâtiment neuf du modèle et P en supprimant les bâtiments existants. Dans P+C les bâtiments de l'environnement urbain ne peuvent être considérés que comme des masques solaires aux parois opaques, il était donc inutile de créer un modèle PwS. Le modèle PinED importé dans Alcyone après reproduction dans SketchUp est représenté sur la figure III.6 (a).

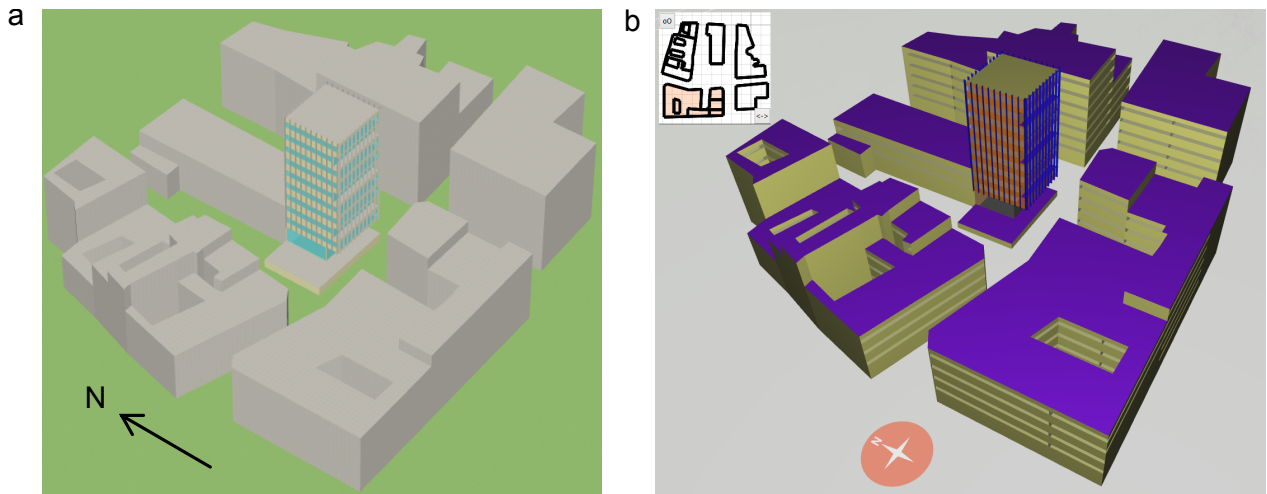


Figure III.6 – Modèle PinED dans Alcyone (a) et dans l'interface graphique de PT_M (b).

Les quatre modèles ont pu être importés directement dans la PFM car PT_M est capable de lire des fichiers IDF, qui sont automatiquement créés à chaque fois qu'une STD est réalisée avec E+ via OpenStudio. Le modèle PinED enrichi par PT_M est représenté sur la figure III.6 (b).

3.3 Mise en données des modèles

Après avoir modélisé la partie géométrique des modèles, nous avons défini leurs paramètres non-géométriques. Ces paramètres sont les mêmes pour les quatre modèles, mais sont parfois différents entre le nouveau bâtiment et les bâtiments environnants, comme nous le détaillons par la suite. Pour la première étape de la comparaison inter-logiciels, nous avons choisi des hypothèses de modélisation aussi réalistes que possible, en sachant qu'elles devaient pouvoir être partagées par les trois outils. Cette première étape est nommée « version 0 ». La prise en compte de ces hypothèses dans la PFM se fait, en fonction de leur nature, soit avec PT_M (chargé de générer le gbXML_M à partir de la maquette initiale) soit avec PyRosette (chargé de générer le modèle BSP à partir du gbXML_M). La mise en données des modèles dans la PFM a été réalisée par EDF R&D.

3.3.1 Composition de l'enveloppe des bâtiments

Nous avons défini la composition de l'enveloppe du bâtiment neuf en nous efforçant de respecter au maximum les plans dessinés par les étudiants de l'ENSAV. Ainsi, les murs extérieurs de ce

bâtiment (parties non-vitrées) sont des panneaux légers isolés avec 10 cm de laine de roche. Leur surface extérieure est en acier peint en gris, avec une émissivité infrarouge de 0.9 et un albedo⁸ de 0.7. Les parois vitrées sont composées d'un double-vitrage à lame d'argon, avec un facteur solaire⁹ de 0.55. La PFM ne permet pas pour l'instant de modéliser des fenêtres avec des cadres, donc aucune menuiserie n'est modélisée dans les trois outils mais elles sont prises en compte dans le calcul du coefficient de déperdition thermique moyen des fenêtres. Les brise-soleil verticaux ont un albedo de 0.2. Le plancher bas du premier étage du bâtiment, qui donne sur le rez-de-chaussée non occupé, ainsi que la toiture du dernier étage sont isolés par l'extérieur avec 12 cm de polystyrène expansé. La toiture est de couleur blanche, avec une émissivité infrarouge de 0.9 et un albedo de 0.9. La première ligne du [tableau III.2](#) donne les valeurs des coefficients de déperdition thermique des parois du nouveau bâtiment.

A défaut de données à disposition, la définition de la composition de l'enveloppe des bâtiments de l'environnement urbain s'est appuyée sur les habitudes locales connues de construction et l'observation des façades avec l'outil « Earth » du site « Google map ». Ainsi, les murs extérieurs sont en béton avec une isolation intérieure de 5 cm de laine de roche. Leur surface extérieure est recouverte de chaux blanche avec une émissivité infrarouge de 0.9 et un albedo de 0.9. Les fenêtres sont composées d'un simple vitrage, avec un facteur solaire de 0.59. Le plancher bas du premier étage des bâtiments, qui donne sur le rez-de-chaussée non occupé, n'est pas isolé. La toiture du dernier étage de chaque bâtiment existant n'est pas isolée non plus. Elle est de couleur foncée, avec une émissivité thermique de 0.9 et un albedo de 0.3. La deuxième ligne du [tableau III.2](#) donne les valeurs des coefficients de déperdition thermique des parois et fenêtres des bâtiments existants.

	Mur extérieur	Fenêtres	Plancher du premier étage	Toiture
Bâtiment neuf	0.31	1.70	0.45	0.36
Bâtiments existants	0.82	4.08	5.40	5.08

Tableau III.2 – Coefficients de déperdition thermique des parois et fenêtres [W/(m².K)] des bâtiments modélisés.

Comme on peut le voir sur la [figure III.2](#) ([partie 3.1 de ce chapitre](#)), certains bâtiments existants modélisés par les étudiants de l'ENSAV ont en réalité des parois mitoyennes à d'autres bâtiments qui ne sont pas représentés. On peut considérer qu'en réalité, les déperditions thermiques à travers ces parois sont faibles car les pièces situées de part et d'autre sont maintenues en température, de façon simultanée si les bâtiments ont les mêmes usages. Nous avons donc défini les conditions aux limites extérieures de ces parois comme étant adiabatiques, c'est à dire qu'il n'y a pas d'échange de chaleur entre elles et l'environnement extérieur. Elles ne sont pas non plus exposées au vent et au soleil, contrairement aux murs extérieurs. Une partie de ces parois (celles exposées à l'ouest et au sud) sont représentées en rose sur la [figure III.7](#).

8. L'albedo d'une surface est le rapport de la quantité de rayonnement CLO qu'elle réfléchit à celle qu'elle reçoit.

9. Le facteur solaire d'un vitrage est le rapport de l'énergie solaire entrant dans la pièce à travers le vitrage à l'énergie solaire incidente sur ce vitrage.

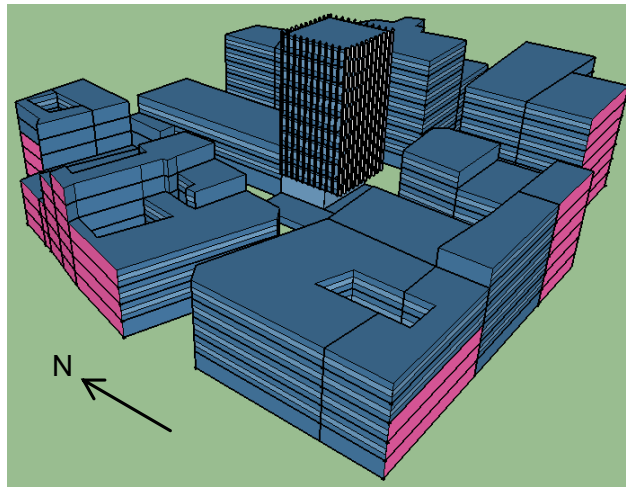


Figure III.7 – Modèle PinED avec une coloration en rose pour les parois adiabatiques, non exposées au vent et au soleil.

3.3.2 Charges internes

Le bâtiment neuf que nous avons modélisé est constitué d'un rez-de-chaussée non occupé, dans lequel nous avons considéré qu'il n'y a aucun apport interne, ainsi que de neuf étages de bureaux. Dans ces espaces nous avons défini une densité d'occupation de 0.2 personne/m² lorsqu'ils sont occupés à 100 %, c'est à dire du lundi au vendredi de 8h à 12h et de 13h à 18h. En semaine l'occupation est de 50 % entre 12h et 13h. Le reste du temps, l'ensemble du bâtiment est considéré comme inoccupé. Dans nos modèles, une personne présente dans les étages de bureaux dégage par métabolisme une chaleur sensible de 75 W en été et 90 W le reste de l'année. La puissance dégagée par les appareils électriques (éclairage compris) a une valeur de 13 W/m² en période d'occupation et est nulle le reste du temps.

Le quartier étudié étant résidentiel, nous avons considéré que tous les bâtiments existants sont utilisés comme logements. Aucun apport interne n'est pris en compte au rez-de-chaussée de chacun de ces bâtiments, qui n'est pas habité. Pour les autres étages, la densité d'occupation est de 0.05 personne/m² lorsqu'ils sont occupés à 100 %, c'est à dire tout le weekend et de 18h à 7h en semaine. Du lundi au vendredi ce taux d'occupation descend à 50 % entre 11h et 13h et à 25 % entre 7h et 11h ainsi qu'entre 13h et 18h. Quel que soit le jour considéré, dans nos modèles une personne présente dégage une chaleur sensible de 63 W entre 23h et 7h, en dehors de ces horaires les valeurs sont 70 W en été et 80 W le reste de l'année. La puissance dégagée par les appareils électriques (éclairage compris) a une valeur de 7 W/m² de 7h à 8h, de 11h à 13h et de 18h à 23h ; et de 1.2 W/m² le reste du temps.

3.3.3 Chauffage, refroidissement et renouvellement d'air

Dans les étages occupés du nouveau bâtiment, les consignes de chauffage et de refroidissement sont respectivement de 20 °C et 26 °C de 7h à 19h du lundi au vendredi et de 16 °C et 30 °C de 19h à 7h du lundi au vendredi, ainsi que tout le weekend. Le rez-de-chaussée n'est pas maintenu en

température. Le taux de renouvellement d'air dans les pièces occupées est fixé à 0.59 vol/h toute l'année mais en été sa valeur passe à 1.72 vol/h si la température extérieure est inférieure à 26 °C. Le taux de renouvellement d'air au rez-de-chaussée du bâtiment est fixé à 1 vol/h.

Dans les bâtiments de l'environnement urbain, les consignes de chauffage et de refroidissement sont respectivement fixées à 20 °C et 26 °C en continu pour les étages habités. Le rez-de-chaussée n'est pas maintenu en température. Le taux de renouvellement d'air est fixé à 1 vol/h en permanence pour tous les étages, rez-de-chaussée compris.

3.3.4 Coefficients de transfert convectif

Avec E+ et BSP, il y a plusieurs possibilités de calcul des coefficients de transfert convectif (hc) des parois des bâtiments. Il est par exemple possible d'utiliser une corrélation qui lie hc à la vitesse du vent, ou de le considérer comme constant au cours du temps. Dans P+C, pour toutes les parois hc est forcément constant. Afin d'être en mesure de comparer les outils sur la même base, pour toutes les parois nous avons défini hc dans les modèles E+ et BSP comme étant constant et de même valeur que celle prise dans les modèles P+C. La valeur de hc varie si l'échange convectif se fait entre la paroi et l'intérieur de la pièce (hc_{int}), ou entre la paroi et l'air extérieur (hc_{ext}). Elle varie aussi en fonction du type de paroi (verticale ou horizontale) et du sens du flux thermique (ascendant ou descendant). On aura ainsi des valeurs différentes pour un plancher donnant sur l'extérieur (cas d'un balcon) ou une toiture. Dans P+C pour chaque configuration une seule valeur est disponible pour hc_{int} mais trois valeurs sont disponibles pour hc_{ext} , selon l'exposition au vent de la paroi qui peut être « normale », « abritée » ou « sévère ». Nous avons choisi les valeurs correspondant à une exposition au vent normale pour tous les bâtiments. Finalement, les valeurs de hc retenues dans les trois outils sont détaillées dans le [tableau III.3](#). Ces valeurs sont les mêmes pour le bâtiment neuf et pour les bâtiments existants.

Type de paroi	hc_{int} (W/m ² .K)	hc_{ext} (W/m ² .K)
Mur extérieur	3.29	14.9
Mur intérieur	3.29	
Plancher donnant sur l'extérieur	1.78	20
Plancher intermédiaire	3	
Toiture	4.59	18.9
Plafond intermédiaire	3	

Tableau III.3 – Coefficients de transfert convectif des parois des bâtiments modélisés.

3.3.5 Echanges radiatifs CLO et détail des versions considérées

3.3.5. i) Possibilités de modélisation des échanges radiatifs CLO avec P+C, E+ et la PFM

Le [tableau III.4](#) récapitule les possibilités offertes par les différents outils, relatives à la modélisation des échanges radiatifs CLO et détaillées dans la suite de cette partie.

	P+C	E+	PFM
Masques solaires	X	X	X
1 réflexion CLO sur le sol	X	X	X
Ombres portées sur le sol		X	X
1 réflexion CLO (sauf sur le sol)		X	X
Plusieurs réflexions CLO (sur toutes les surfaces)			X

Tableau III.4 – Possibilités de modélisation des échanges radiatifs CLO avec les outils étudiés.

Comme nous l'avons déjà mentionné, dans P+C le rayonnement CLO réfléchi par le sol est calculé sans tenir compte des ombres portées sur le sol par les bâtiments voisins. De plus, il n'est pas possible de prendre en compte les inter-réflexions solaires sur l'enveloppe des bâtiments avec P+C.

Dans E+, une option permet de considérer une réflexion CLO sur l'enveloppe des bâtiments et les masques solaires (par exemple les brise-soleil, ou les bâtiments existants dans PwS), ce qui active aussi la prise en compte des ombres portées par les bâtiments sur le sol dans le calcul de la réflexion CLO sur ce dernier.

Dans la PFM, la prise en compte d'une réflexion CLO sur le sol et des ombres portées par les bâtiments sur le sol est couplée, il n'est pas possible de désactiver une fonctionnalité en conservant l'autre. De plus, considérer une réflexion CLO dans la PFM s'applique aussi bien à la réflexion du rayonnement solaire sur l'enveloppe des bâtiments et les masques solaires que sur le sol, on ne peut pas différencier les deux. Par ailleurs, dans la PFM le nombre de réflexions CLO successives sur les surfaces de la scène urbaine (sol, brise-soleil, surfaces extérieures des bâtiments...) n'est pas limité à 1, contrairement à E+.

3.3.5. ii) Caractéristiques des versions retenues

Les caractéristiques des différentes versions étudiées dans la suite de ce chapitre sont réunies dans le [tableau III.5](#). Comme nous l'expliquons par la suite, elles découlent des capacités de P+C, E+ et la PFM présentées dans la partie précédente.

		Version concernée			
		0	1a	1b	2
Outil(s) concerné(s)	P+C	X			
	E+	X	X	X	
	PFM	X	X	X	X
Albédo du sol		0	0	0.2	0.2
Masques solaires		X	X	X	X
1 réflexion CLO (sauf sur le sol)			X		
1 réflexion CLO (sur toutes les surfaces)				X	
3 réflexions CLO (sur toutes les surfaces)					X

Tableau III.5 – Caractéristiques des versions étudiées.

Pour la « version 0 » de notre étude comparative, pour chaque bâtiment les ombres portées par les masques solaires (protection solaire ou bâtiment voisin) sur ses parois sont prises en compte, car ceci est possible avec les trois outils étudiés. En revanche, P+C ne permet pas de tenir compte de l'ombrage du sol et dans la PFM on ne peut pas désactiver cette prise en compte en conservant le calcul d'une réflexion CLO sur le sol. Afin d'harmoniser les hypothèses considérées dans les trois outils, dans la version 0 aucune réflexion CLO n'est prise en compte sur le sol. Dans P+C et E+ ceci se fait en fixant l'albédo du sol à 0, ce que nous avons donc aussi fait dans la PFM. Enfin, dans cette version 0 aucune réflexion CLO n'est prise en compte sur les surfaces des bâtiments ni sur les protections solaires, pour s'aligner sur les possibilités de P+C.

Dans une deuxième version nommée « version 1a », nous avons activé la prise en compte d'une réflexion CLO sur l'enveloppe des bâtiments et les protections solaires. Cette version concerne uniquement E+ et la PFM étant donné que ce calcul n'est pas implémenté dans P+C. Dans cette version, l'albédo du sol reste fixé à 0 pour que la réflexion du rayonnement solaire sur sa surface ne soit pas prise en compte.

Dans une troisième version nommée « version 1b », nous avons fixé l'albédo du sol à 0.2 dans E+ et PT_M. Une réflexion CLO sur le sol est donc prise en compte, en plus de celle calculée sur l'enveloppe des bâtiments et les protections solaires.

La quatrième version, nommée « version 2 », concerne seulement la PFM. Dans cette version trois réflexions CLO sont prises en compte sur le sol, l'enveloppe des bâtiments et les protections solaires. Ceci n'est pas possible dans E+, qui ne peut pas calculer plus d'une réflexion CLO sur ces surfaces.

3.4 Evaluation de l'opération de densification

Le projet que nous étudions ici consiste à intégrer un nouveau bâtiment au sein d'un îlot urbain existant. Pour évaluer cette opération dans son ensemble, il est important de mesurer son impact sur le bilan énergétique des bâtiments existants. Dans notre cas, cela revient à comparer les besoins énergétiques des bâtiments existants du modèle ED (avant l'intégration du bâtiment neuf) et ceux du modèle PinED (après cette intégration). Par ailleurs, dans ce contexte urbain particulièrement dense, les bâtiments existants vont avoir un impact sur le bilan énergétique du nouveau bâtiment. On peut quantifier cet impact en comparant les besoins énergétiques du bâtiment neuf s'il était construit en site isolé (modèle P) ou dans l'environnement urbain dans lequel son implantation est effectivement envisagée (modèle PinED). Pour ce dernier cas on pourrait aussi utiliser le modèle PwS, mais nous verrons à la fin de ce chapitre que le modèle PinED permet d'évaluer plus précisément le bilan énergétique du nouveau bâtiment. Nous étudions donc ici les modèles P, PinED et ED.

3.4.1 Impacts du bâtiment neuf sur les bâtiments existants

Les besoins énergétiques de l'ensemble des bâtiments de l'environnement urbain pour chaque version des modèles ED et PinED obtenus avec les outils concernés sont rassemblés dans le [tableau](#)

III.6. Nous présentons aussi les écarts relatifs (tableau III.7) et absolus (tableau III.8) entre ces résultats obtenus pour les modèles ED et PinED.

	Besoins de chauffage						Besoins de refroidissement					
	ED			PinED			ED			PinED		
	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM
0	151.6	174.8	155.2	152.2	175.8	156.3	3.3	0.4	2.8	3.0	0.4	2.4
1a		171.8	152.4		172.9	153.7		0.7	3.6		0.6	3.1
1b		170.8	151.2		172.0	152.6		0.8	4.1		0.7	3.6
2			147.2			148.7			5.9			5.1

Tableau III.6 – Besoins énergétiques [kWh/(m².an)] de l'ensemble des bâtiments existants obtenus pour chaque version des modèles ED (sans le bâtiment neuf) et PinED (avec le bâtiment neuf), avec les outils concernés.

	$\frac{\text{PinED}-\text{ED}}{\text{ED}}$					
	Besoins de chauffage			Besoins de refroidissement		
	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM
0	+ 0.4 %	+ 0.6 %	+ 0.7 %	- 8.3 %	- 15.7 %	- 12.1 %
1a		+ 0.6 %	+ 0.8 %		- 14.7 %	- 13.2 %
1b		+ 0.7 %	+ 0.9 %		- 14.8 %	- 13.3 %
2			+ 1.0 %			- 13.1 %

Tableau III.7 – Ecart relatif [%] entre les besoins énergétiques agrégés sur l'ensemble des bâtiments existants obtenus avec les modèles ED et PinED, pour toutes les versions, avec les outils concernés.

	PinED – ED					
	Besoins de chauffage			Besoins de refroidissement		
	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM
0	+ 0.62	+ 1.02	+ 1.05	- 0.27	- 0.07	- 0.33
1a		+ 1.10	+ 1.29		- 0.10	- 0.48
1b		+ 1.18	+ 1.36		- 0.12	- 0.55
2			+ 1.52			- 0.77

Tableau III.8 – Ecart absolu [kWh/(m².an)] entre les besoins énergétiques agrégés sur l'ensemble des bâtiments existants obtenus avec les modèles ED et PinED, pour toutes les versions, avec les outils concernés.

Quels que soient l'outil et la version considérés, l'implantation du bâtiment neuf (passage du modèle ED au modèle PinED) provoque une faible augmentation des besoins de chauffage et une faible diminution des besoins de refroidissement de l'ensemble des bâtiments existants. Les écarts relatifs entre les besoins de refroidissement obtenus pour les deux modèles sont non négligeables mais ces besoins étant très faibles, les écarts absolus sont très petits. Parmi les 22 bâtiments existants, certains sont séparés du bâtiment neuf par un autre bâtiment ou sont éloignés de ce nouveau bâtiment. Dans ce cas, il est prévisible que l'intégration du bâtiment neuf dans le quartier ait un impact très faible sur leurs besoins énergétiques, ce qui se répercute sur les résultats agrégés sur l'ensemble de l'îlot. Il est donc intéressant d'observer l'impact de la densification du quartier sur chacun des bâtiments qui le composent. Pour faciliter la présentation des besoins énergétiques obtenus pour les bâtiments existants, nous les avons numérotés de 1 à 22 comme indiqué sur la

figure III.8. Les figures III.9 et III.10 présentent respectivement les besoins de chauffage et de refroidissement obtenus avec la PFM pour chacun des bâtiments existants, à partir de la version 2 des modèles ED et PinED.

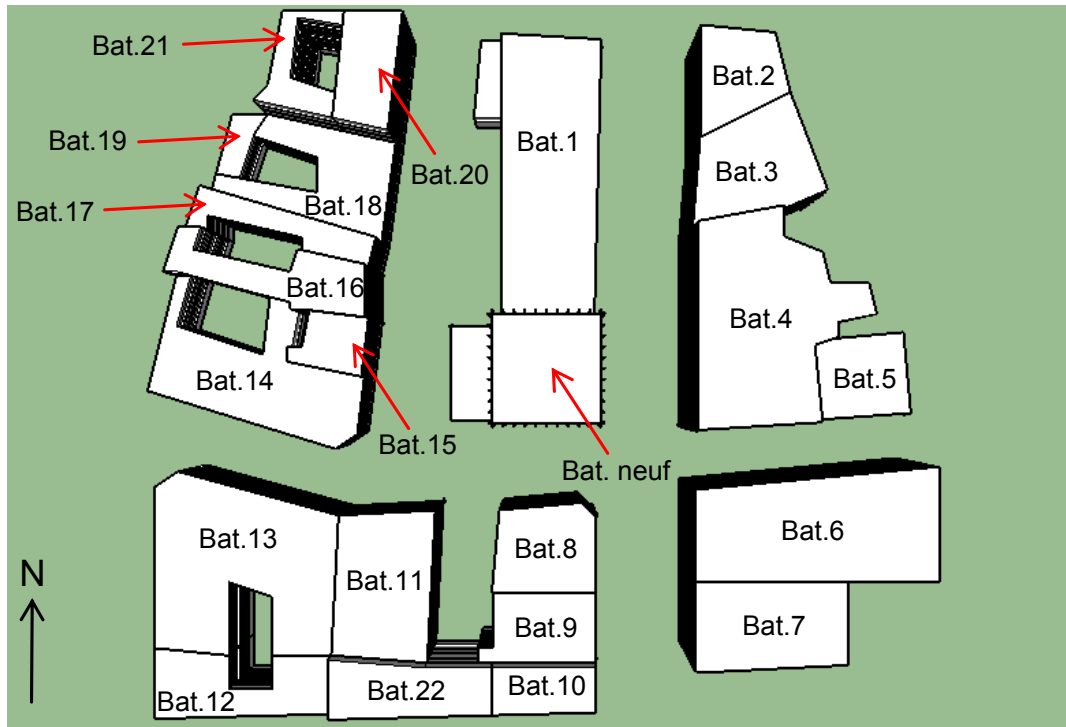


Figure III.8 – Vue du dessus du modèle PinED avec la numérotation des bâtiments du quartier.

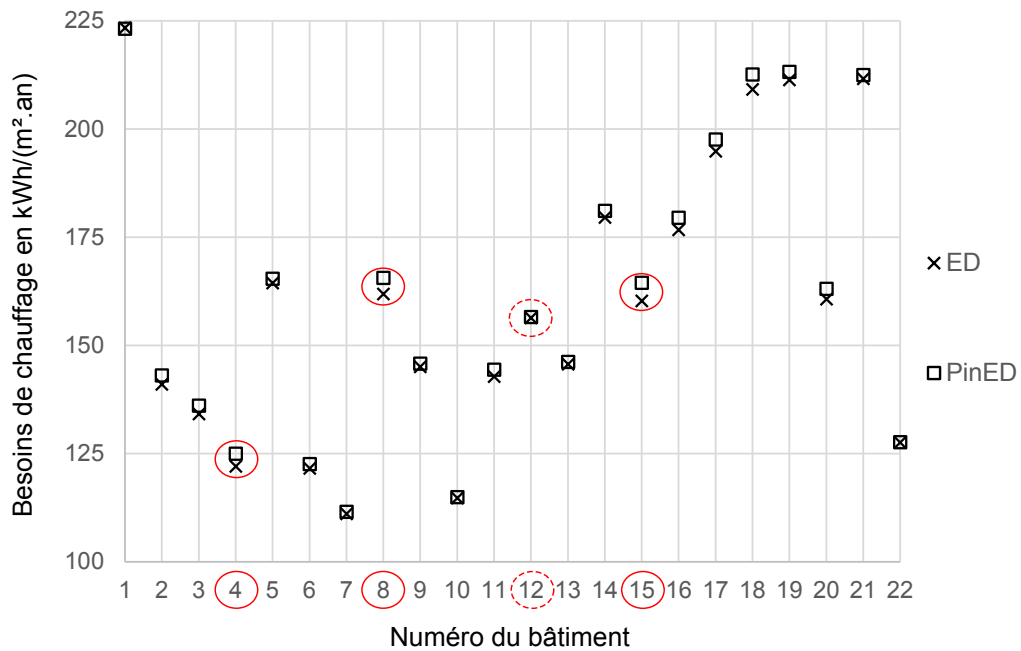


Figure III.9 – Estimation de l'impact de l'implantation du bâtiment neuf sur les besoins de chauffage des bâtiments existants en comparant les résultats obtenus avec la PFM pour la version 2 des modèles ED (bâtiments existants seuls) et PinED (bâtiments existants + bâtiment neuf).

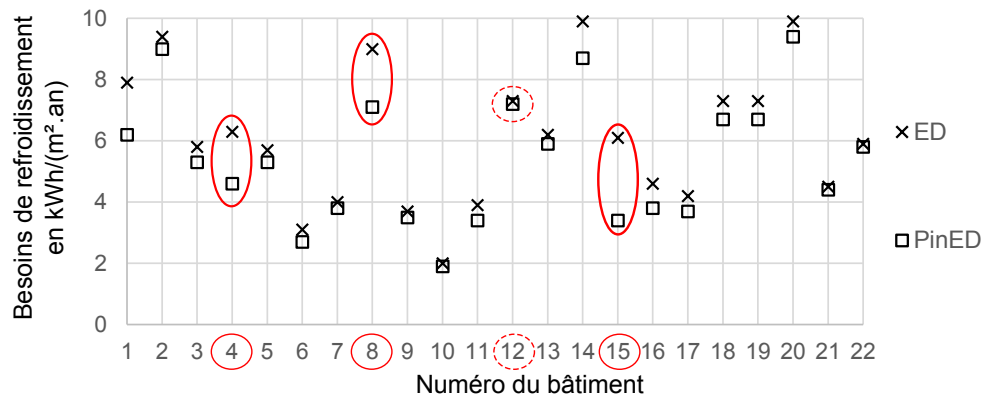


Figure III.10 – Estimation de l'impact de l'implantation du bâtiment neuf sur les besoins de refroidissement des bâtiments existants en comparant les résultats obtenus avec la PFM pour la version 2 des modèles ED (bâtiments existants seuls) et PinED (bâtiments existants + bâtiment neuf).

Les tendances observées pour les résultats agrégés sur l'ensemble du quartier existant se retrouvent sur ces figures. On note cependant que les besoins énergétiques de certains bâtiments (par exemple les bâtiments 4, 8 et 15) sont particulièrement impactés par l'arrivée du nouveau bâtiment, bien que l'écart entre les modèles reste faible même pour ces bâtiments. Ainsi, pour le bâtiment 15 qui est le plus impacté, l'intégration du bâtiment neuf dans le quartier provoque une augmentation de 2.6 % de ses besoins de chauffage (de 160.3 à 164.5 kWh/(m².an)) et une diminution de 44.3 % de ses besoins de refroidissement (de 6.1 à 3.4 kWh/(m².an)).

Ces différences s'expliquent par la position des bâtiments existants par rapport à l'emplacement du bâtiment neuf au sein du quartier. Ainsi, le bâtiment 12 (quasiment pas impacté par la densification de l'îlot) est éloigné du bâtiment neuf - plus de 40 m - et isolé de ce dernier par d'autres bâtiments qui l'entourent, tandis que la façade est du bâtiment 15 fait directement face au nouveau bâtiment et est située à 17 m de ce dernier. De plus, le bâtiment 12 étant au sud-ouest du bâtiment neuf il risque moins d'être impacté par des ombres portées par ce bâtiment que le bâtiment 15, qui est à l'ouest du bâtiment neuf.

3.4.2 Impacts de l'environnement urbain sur le bâtiment neuf

3.4.2. i) Comparaison des résultats obtenus avec les versions 0, 1a, 1b et 2

Les besoins énergétiques de l'ensemble du nouveau bâtiment pour chaque version des modèles P et PinED obtenus avec les outils concernés sont présentés dans le [tableau III.9](#). Nous présentons aussi les écarts relatifs ([tableau III.10](#)) et absolus ([tableau III.11](#)) entre ces résultats obtenus pour les modèles P et PinED.

Tout d'abord, on constate que les impacts de la modélisation de l'environnement urbain sur le bilan énergétique du bâtiment neuf obtenus avec la version 0 de P et PinED sont très proches pour P+C, E+ et PFM. De la même façon, la PFM et E+ donnent des estimations similaires de ces impacts lorsqu'ils les évaluent avec la version 1a ou 1b des modèles P et PinED. Cette proximité

	Besoins de chauffage						Besoins de refroidissement					
	P			PinED			P			PinED		
	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM
0	34.2	27.3	29.3	37.4	29.7	32.3	28.2	21.1	37.4	22.1	16.0	28.6
1a		26.8	28.6		28.1	30.0		22.4	40.0		21.0	37.8
1b		25.2	26.6		27.6	29.6		29.6	51.3		22.9	40.2
2			26.2			27.4			53.2			53.5

Tableau III.9 – Besoins énergétiques [kWh/(m².an)] du bâtiment neuf obtenus pour chaque version des modèles P et PinED, avec les outils concernés.

	$\frac{\text{PinED}-\text{P}}{\text{P}}$					
	Besoins de chauffage			Besoins de refroidissement		
	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM
0	+ 9.4 %	+ 9.0 %	+ 10.2 %	- 21.7 %	- 24.0 %	- 23.5 %
1a		+ 4.6 %	+ 4.9 %		- 6.2 %	- 5.5 %
1b		+ 9.6 %	+ 11.3 %		- 22.9 %	- 21.6 %
2			+ 4.6 %			+ 0.6 %

Tableau III.10 – Ecarts relatifs [%] entre les besoins énergétiques agrégés sur l'ensemble du bâtiment neuf obtenus avec les modèles P (bâtiment neuf seul) et PinED (bâtiment neuf + bâtiments existants), pour toutes les versions, avec les outils concernés.

	PinED – P					
	Besoins de chauffage			Besoins de refroidissement		
	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM
0	+ 3.2	+ 2.5	+ 3.0	- 6.1	- 5.1	- 8.8
1a		+ 1.2	+ 1.4		- 1.4	- 2.2
1b		+ 2.4	+ 3.0		- 6.8	- 11.1
2			+ 1.2			+ 0.3

Tableau III.11 – Ecarts absolus [kWh/(m².an)] entre les besoins énergétiques agrégés sur l'ensemble du bâtiment neuf obtenus avec les modèles P (bâtiment neuf seul) et PinED (bâtiment neuf + bâtiments existants), pour toutes les versions, avec les outils concernés.

de résultats entre la PFM et des outils de STD robustes comme P+C et E+ joue en faveur de la cohérence de cette plateforme.

On voit ici que la modélisation de l'environnement urbain du bâtiment neuf (passage du modèle P au modèle PinED) provoque une augmentation non négligeable de ses besoins de chauffage et une forte baisse de ses besoins de refroidissement. Ces écarts sont plus faibles pour les versions 1a et 2 que pour les version 0 et 1b. Dans la version 0, les différences de résultats entre les deux modèles sont uniquement dues aux ombres portées par les bâtiments existants sur le nouveau bâtiment dans PinED.

En passant de la version 0 à la version 1a, la prise en compte d'une réflexion CLO sur les surfaces extérieures des bâtiments diminue les besoins de chauffage du bâtiment neuf et augmente ses besoins de refroidissement, de façon plus importante dans PinED que dans P. Cette différence est

due aux nombreuses ombres portées par les bâtiments sur les façades de leurs voisins dans PinED, phénomène qu'on ne retrouve pas dans P car le bâtiment neuf est modélisé en site dégagé, donc sans environnement urbain. Ceci réduit l'écart entre les besoins énergétiques du bâtiment neuf entre P et PinED, car les besoins de chauffage (respectivement de refroidissement) de ce bâtiment sont plus faibles (respectivement plus importants) dans P que dans PinED. C'est aussi le cas, pour les mêmes raisons, pour le passage de la version 1b à la version 2 avec la prise en compte de deux réflexions CLO supplémentaires sur toutes les surfaces.

A l'inverse, en passant de la version 1a à la version 1b une réflexion CLO sur le sol est activée ce qui diminue les besoins de chauffage du nouveau bâtiment et augmente ses besoins de refroidissement de façon plus importante dans P que dans PinED. Cet écart est dû aux ombres portées sur le sol qui sont beaucoup plus importantes dans PinED (23 bâtiments modélisés) que dans P (un seul bâtiment modélisé). Ceci augmente donc l'écart entre les besoins énergétiques de P et PinED.

3.4.2. ii) Importance du calcul des échanges CLO pour une bonne estimation de l'influence de l'environnement urbain sur les besoins énergétiques du bâtiment neuf

La figure III.11 présente les besoins énergétiques de chaque étage du bâtiment neuf obtenus avec la PFM pour les modèles P et PinED, en prenant en compte trois réflexions CLO sur toutes les surfaces extérieures (version 2).

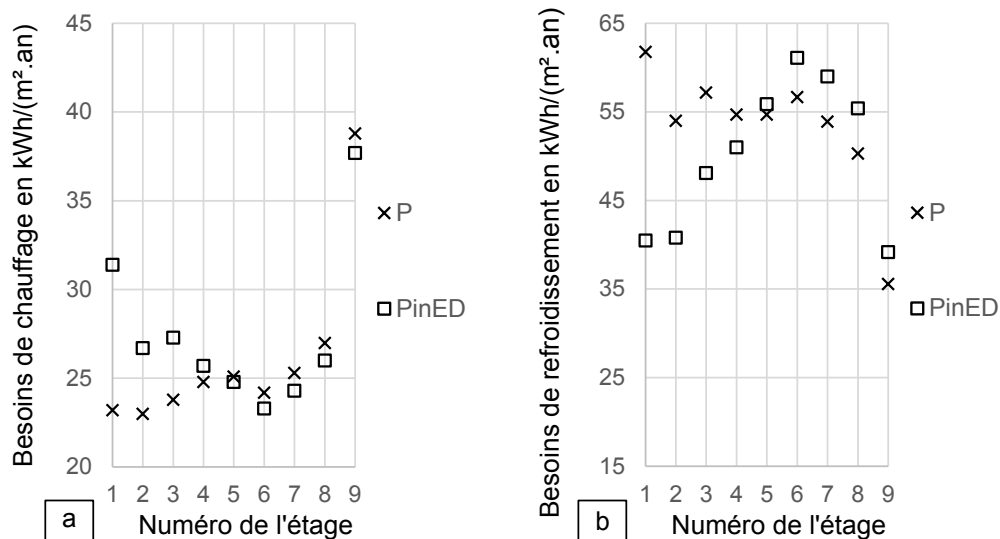


Figure III.11 – Comparaisons des besoins de chauffage (a) et de refroidissement (b) de chaque étage du bâtiment neuf obtenus avec la PFM pour la version 2 des modèles P (bâtiment neuf seul) et PinED (bâtiment neuf + bâtiments existants).

On observe sur cette figure que la différence entre les besoins énergétiques est très forte pour le premier étage du bâtiment : le passage de P à PinED fait augmenter ses besoins de chauffage de 35 % et diminuer ceux de refroidissement de 34 %. Ces écarts diminuent au fur et à mesure que l'on monte dans les étages, jusqu'à s'inverser à partir du cinquième étage : le passage de P à PinED provoque alors une légère diminution des besoins de chauffage et une augmentation des besoins de refroidissement. Ceci vient de la taille du nouveau bâtiment, qui avec ses 32.5 m de

hauteur dépasse tous les bâtiments qui l'entourent¹⁰. Ainsi, les premiers étages du bâtiment neuf sont impactés par les ombres portées par les bâtiments voisins mais pas les étages les plus hauts. De plus, ces derniers peuvent recevoir le rayonnement CLO réfléchi par les toitures des bâtiments existants, ce qui n'est pas le cas des étages les plus bas. Contrairement à ce qu'on pourrait penser au premier abord, le contexte urbain dans lequel vient s'implanter le bâtiment neuf fait qu'à partir de son cinquième étage, la prise en compte des bâtiments existants provoque une diminution de ses besoins de chauffage et une augmentation de ses besoins de refroidissement.

La figure III.12 présente les besoins énergétiques de chaque étage du bâtiment neuf en environnement dégagé (modèle P) et au sein de l'îlot urbain (modèle PinED), obtenus avec la PFM à partir de la version 0 donc sans prendre en compte aucune réflexion CLO.

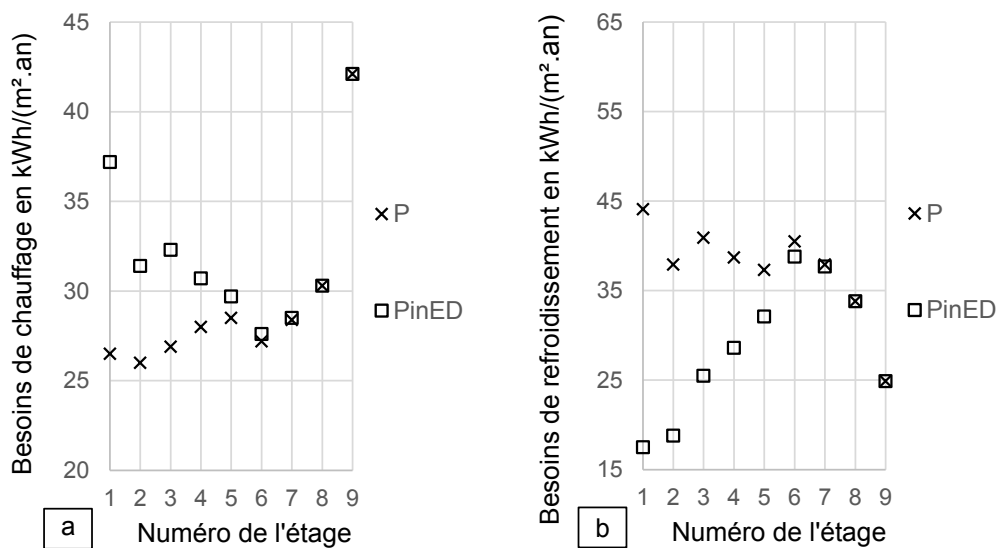


Figure III.12 – Comparaisons des besoins de chauffage (a) et de refroidissement (b) de chaque étage du bâtiment neuf obtenus avec la PFM pour la version 0 des modèles P (bâtiment neuf seul) et PinED (bâtiment neuf + bâtiments existants).

Pour les premiers étages de ce bâtiment, on observe la même tendance que pour les résultats obtenus avec la version 2 des modèles, encore plus prononcée car ici il n'y a pas de réflexion solaire pour contrebalancer les effets de masques. Ainsi, la modélisation des bâtiments existants fait augmenter les besoins de chauffage du premier étage du bâtiment neuf de 40 % et diminuer ses besoins de refroidissement de 60 %. Pour les trois derniers étages on ne retrouve pas l'inversion nette remarquée avec la version 2. Ici, aucune réflexion CLO n'étant prise en compte, le rayonnement CLO réfléchi par les toitures des bâtiments existants ne peut pas diminuer les besoins de chauffage des derniers étages du nouveau bâtiment et augmenter leurs besoins de refroidissement. Pour évaluer les impacts de l'environnement urbain d'un bâtiment sur ses besoins énergétiques il faut donc veiller à ce que les échanges CLO entre les bâtiments soient calculés. Une modélisation trop simplifiée conduirait à sur-estimer l'impact du contexte urbain sur les besoins de chauffage du bâtiment étudié et à sous-estimer ses besoins de refroidissement.

10. Dans le voisinage du bâtiment neuf, les bâtiments les plus élevés au sud, à l'est et à l'ouest ont une hauteur respective de 18 m, 24 m et 18 m.

3.4.3 Commentaires

L'opération de densification étudiée ici a un impact modéré sur le bilan énergétique total de l'ensemble des bâtiments existants du quartier, ainsi que sur celui de chacun d'entre eux. Néanmoins, lorsqu'on étudie le quartier entier la surface considérée est très grande et un faible écart entre les besoins énergétiques surfaciques annuels peut représenter une grande quantité d'énergie. Ainsi, la surface totale maintenue en température pour l'ensemble des bâtiments existants est 20594.1 m². Le [tableau III.8 de la partie 3.4.1](#) montre que l'intégration du bâtiment neuf dans le quartier, évaluée en prenant en compte trois réflexions CLO sur toutes les surfaces (version 2) avec la PFM, provoque pour l'ensemble des bâtiments existants une augmentation des besoins de chauffage de 1.52 kWh/(m².an) et une diminution de ceux de refroidissement de 0.77 kWh/(m².an). Ceci représente donc une augmentation des besoins de chauffage de 31398 kWh/an et une diminution de ceux de refroidissement de 15864 kWh/an. En supposant que ces besoins se compensent, l'impact net de la densification de l'îlot sur les besoins énergétiques des bâtiments qui le composent est de 15534 kWh/an.

Nous avons vu dans [la partie 3.4.2. i](#) ([tableau III.9](#)) que les besoins énergétiques du bâtiment neuf calculés avec la PFM pour la version 2 du modèle PinED sont de 27.4 kWh/(m².an) pour le chauffage et 53.5 kWh/(m².an) pour le refroidissement. La surface totale maintenue en température de ce bâtiment est 1563.8 m² donc les besoins énergétiques annuels du bâtiment neuf sont de 42848 kWh/an pour le chauffage et 83662 kWh/an pour le refroidissement, soit un total de 126510 kWh/an. L'impact énergétique net de l'implantation du nouveau bâtiment dans le quartier existant représente donc un supplément de 12 % par rapport aux besoins énergétiques de ce bâtiment, ce qui est relativement faible. Cependant, les bâtiments de logement anciens sont rarement climatisés, on peut donc supposer qu'en réalité l'augmentation des besoins de chauffage ne serait pas compensée par la diminution des besoins de refroidissement. En se focalisant sur le chauffage, l'impact de la densification du quartier représente un supplément de 73 % par rapport aux besoins du bâtiment neuf. De plus, les systèmes de chauffage installés dans les bâtiments de logement anciens sont généralement plus énergivores et polluants que ceux installés dans les nouveaux bâtiments. On voit donc que lors de la conception d'un projet de densification, la minimisation des consommations de chauffage du projet a tout intérêt à se faire en prenant en compte l'impact de l'intégration du bâtiment neuf sur le bilan énergétique des bâtiments environnants.

Par ailleurs, on observe de grandes différences entre les besoins énergétiques du nouveau bâtiment obtenus avec et sans prise en compte des bâtiments existants, *a fortiori* lorsqu'on regarde les résultats étage par étage. Ceci vient confirmer, une fois de plus, l'intérêt de la modélisation de l'environnement urbain d'un bâtiment lors de l'évaluation de ses besoins énergétiques. Enfin, les derniers résultats présentés ont montré que si cette modélisation se fait sans prise en compte des inter-réflexions CLO sur toutes les surfaces de la scène urbaine, l'estimation des impacts des bâtiments existants sur le bilan énergétique du bâtiment neuf risque d'être faussée.

3.5 Comparaison des résultats obtenus avec les différents outils, version 0

Des STD ont été réalisées sur la version 0 des quatre modèles (ED, P, PwS et PinED) avec P+C, E+ et la PFM. Toutes les STD effectuées avec la PFM sont l'œuvre d'EDF R&D. Dans la version 0, comme nous l'avons expliqué précédemment, aucune réflexion CLO sur les parois des bâtiments n'est prise en compte. En conséquence, dans les modèles PwS et PinED l'environnement urbain est vu de la même façon pour le nouveau bâtiment, c'est à dire comme des masques solaires qui projettent des ombres mais sur lesquels il n'y a aucune réflexion CLO. Les besoins énergétiques du bâtiment neuf obtenus pour PwS et PinED sont donc très proches et on ne présente dans cette partie que ceux obtenus pour PinED.

3.5.1 Besoins énergétiques du bâtiment neuf

3.5.1. i) Modèle P, bâtiment neuf seul

Le [tableau III.12](#) donne les besoins énergétiques de l'ensemble du bâtiment neuf obtenus avec P+C, E+ et la PFM pour le modèle P.

	P+C	E+	PFM
Besoins de chauffage du bâtiment neuf	34.2	27.3	29.3
Besoins de refroidissement du bâtiment neuf	28.2	21.1	37.4

Tableau III.12 – Besoins énergétiques [kWh/(m².an)] obtenus avec les trois outils pour l'ensemble du bâtiment neuf, modèle P, version 0.

Pour les besoins de chauffage, les résultats obtenus avec E+ et la PFM sont particulièrement proches. L'écart relatif le plus important est une augmentation de 25 % des besoins de chauffage obtenus avec P+C par rapport à ceux obtenus avec E+. Pour les besoins de refroidissement, cette fois-ci les résultats obtenus avec la PFM sont plus proches de ceux obtenus avec P+C qu'avec E+. L'écart relatif le plus important est une augmentation de 77 % des besoins de refroidissement obtenus avec la PFM par rapport à ceux obtenus avec E+.

3.5.1. ii) Modèle PinED, bâtiment neuf dans son environnement urbain

Le [tableau III.13](#) donne les besoins énergétiques de l'ensemble du bâtiment neuf obtenus avec les trois outils étudiés pour le modèle PinED.

	P+C	E+	PFM
Besoins de chauffage du bâtiment neuf	37.4	29.7	32.3
Besoins de refroidissement du bâtiment neuf	22.1	16.0	28.6

Tableau III.13 – Besoins énergétiques [kWh/(m².an)] obtenus avec les trois outils pour l'ensemble du bâtiment neuf, modèle PinED, version 0.

Pour les besoins de chauffage, les résultats issus de la STD avec la PFM sont à nouveau plus proches de ceux obtenus avec E+ que de ceux obtenus avec P+C. Une fois de plus, l'écart relatif le

plus important est entre les besoins de chauffage obtenus avec P+C et ceux obtenus avec E+ (+ 26 %). De même que pour le modèle P, ici pour les besoins de refroidissement les résultats obtenus avec la PFM sont plus proches de ceux obtenus avec P+C qu'avec E+. L'écart relatif le plus important est une augmentation de 78 % des besoins de refroidissement obtenus avec la PFM par rapport à ceux obtenus avec E+.

3.5.2 Besoins énergétiques des bâtiments existants

3.5.2. i) Modèle ED, bâtiments existants avant intégration du bâtiment neuf

Les figures III.13 (a) et (b) montrent respectivement les besoins de chauffage et de refroidissement des 22 bâtiments de l'environnement urbain obtenus avec les trois outils pour le modèle ED. Nous rappelons que la numérotation des bâtiments existants est explicitée sur la figure III.8 de la partie 3.4.1. i) de ce chapitre.

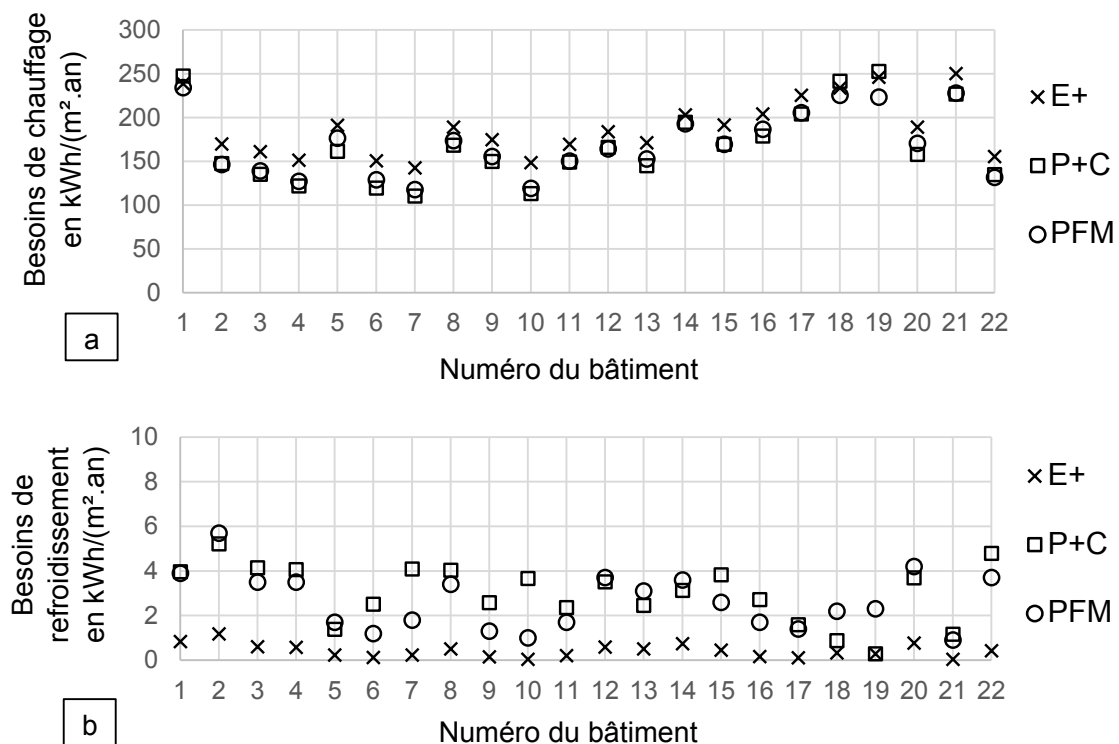


Figure III.13 - Besoins de chauffage (a) et de refroidissement (b) des bâtiments existants obtenus avec les trois outils pour le modèle ED, version 0.

Selon les bâtiments, les besoins de chauffage obtenus avec la PFM sont le plus souvent très proches de ceux obtenus avec P+C, ou situés entre ceux obtenus avec P+C et ceux obtenus avec E+. On retrouve cette tendance dans les écarts relatifs pour l'ensemble du quartier présentés dans la première ligne du tableau III.14. L'écart relatif observé le plus important (- 24 %) concerne le bâtiment 10, entre les besoins de chauffage obtenus avec P+C et la PFM (quasiment identiques pour ce bâtiment) et ceux issus de la STD réalisée avec E+.

	$\frac{P+C-E+}{E+}$	$\frac{PFM-E+}{E+}$	$\frac{P+C-PFM}{PFM}$
Besoins de chauffage du quartier	- 13.3 %	-11.3 %	-2.3 %
Besoins de refroidissement du quartier	+ 641.4 %	+ 524.4 %	+ 18.8 %

Tableau III.14 – Ecarts relatifs entre les besoins énergétiques obtenus avec les trois outils pour l'ensemble des bâtiments existants du quartier, modèle ED, version 0.

En comparant les besoins de refroidissement présentés sur la [figure III.13 \(b\)](#) on observe que pour certains bâtiments les trois outils fournissent des valeurs bien distinctes mais que pour la majorité d'entre eux, les résultats obtenus avec P+C et la PFM sont proches et l'écart avec les besoins de refroidissement obtenus avec E+ est plus important. On note que les besoins de refroidissement des bâtiments existants sont très faibles par rapport à leurs besoins de chauffage. En conséquence, les écarts relatifs observés pour les besoins de refroidissement sont beaucoup plus élevés, aussi bien bâtiment par bâtiment que pour l'ensemble du quartier (deuxième ligne du [tableau III.14](#)). Cependant, cette forte différence observée entre les écarts relatifs ne se reflète pas sur les écarts absolus. Ainsi, l'écart relatif observé le plus important (+ 8029 %) concerne le bâtiment 10, entre les besoins de refroidissement obtenus avec E+ (0.05 kWh/(m².an)) et ceux issus de la STD réalisée avec P+C (3.67 kWh/(m².an)). Cet écart relatif peut paraître alarmant mais l'écart absolu entre les deux valeurs n'est que de 3.62 kWh/(m².an). Le [tableau III.15](#) montre que les écarts absolus entre les besoins énergétiques obtenus pour l'ensemble du quartier avec les trois outils sont faibles.

	Ecarts absolus [kWh/(m ² .an)]		
	P+C – E+	PFM – E+	P+C – PFM
Besoins de chauffage du quartier	- 23.2	- 19.6	- 3.6
Besoins de refroidissement du quartier	+ 2.8	+ 2.3	+ 0.5

Tableau III.15 – Ecarts absolus entre les besoins énergétiques obtenus avec les trois outils pour l'ensemble des bâtiments existants du quartier, modèle ED, version 0.

3.5.2. ii) Modèle PinED, bâtiments existants après intégration du bâtiment neuf

Les [figures III.14 \(a\) et \(b\)](#) montrent respectivement les besoins de chauffage et de refroidissement des 22 bâtiments de l'environnement urbain obtenus avec les trois outils pour le modèle PinED.

Les [tableaux III.16 et III.17](#) regroupent respectivement les écarts relatifs et absolus entre les besoins énergétiques agrégés de l'ensemble des bâtiments existants, obtenus avec les trois outils.

	$\frac{P+C-E+}{E+}$	$\frac{PFM-E+}{E+}$	$\frac{P+C-PFM}{PFM}$
Besoins de chauffage du quartier	- 13.4 %	- 11.1 %	- 2.6 %
Besoins de refroidissement du quartier	+ 705.6 %	+ 551.0 %	+ 23.7 %

Tableau III.16 – Écarts relatifs entre les besoins énergétiques obtenus avec les trois outils pour l'ensemble des bâtiments existants du quartier, modèle PinED, version 0.

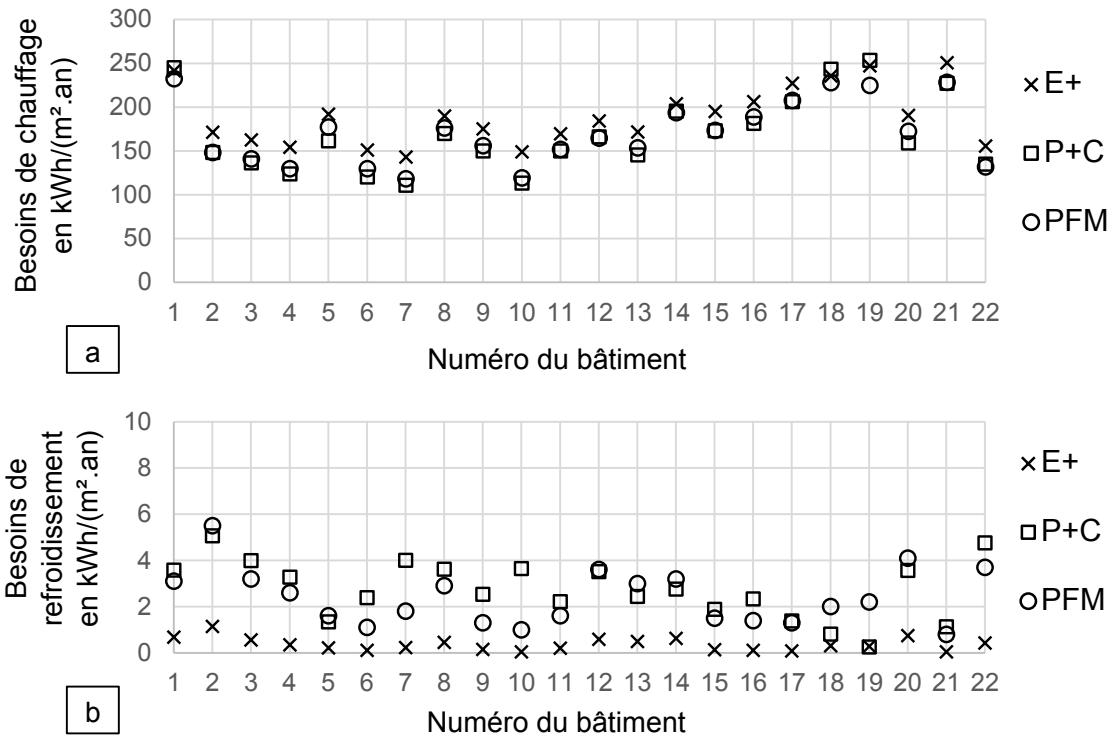


Figure III.14 - Comparaisons des besoins de chauffage (a) et de refroidissement (b) des bâtiments existants obtenus avec les trois outils pour le modèle PinED, version 0.

	Écart absolu [kWh/(m ² .an)]		
	P+C - E+	PFM - E+	P+C - PFM
Besoins de chauffage du quartier	- 23.6	- 19.5	- 4.1
Besoins de refroidissement du quartier	+ 2.6	+ 2.0	+ 0.6

Tableau III.17 - Écart absolu entre les besoins énergétiques obtenus avec les trois outils pour l'ensemble des bâtiments existants du quartier, modèle PinED, version 0.

Pour les besoins de chauffage comme pour ceux de refroidissement l'écart relatif observé le plus important concerne le bâtiment 10, pour les mêmes situations que celles présentées pour le modèle ED, et avec des valeurs similaires. Tous les résultats étant très proches de ceux obtenus pour le modèle ED, les mêmes observations que celles formulées ci-dessus peuvent être faites.

3.5.3 Commentaires

Pour le bâtiment neuf l'écart maximum observé pour les besoins de chauffage est pour le modèle PinED avec une augmentation de 26 % - soit une hausse de 7.7 kWh/(m².an) - entre les résultats obtenus avec E+ et ceux obtenus avec P+C. Pour les besoins de refroidissement, l'écart maximum observé est pour le modèle PinED avec une augmentation de 78 % - soit une hausse de 12.6 kWh/(m².an) - entre les résultats obtenus avec E+ et ceux obtenus avec la PFM.

Pour les bâtiments existants, les écarts observés sont quasiment identiques entre les modèles ED et PinED. Pour le modèle ED, en ce qui concerne les besoins de chauffage, l'écart maximum

observé est pour le bâtiment 10 avec une diminution de 24 % - soit une baisse de 36.0 kWh/(m².an) - entre les résultats obtenus avec E+ et ceux obtenus avec P+C. Pour les besoins de refroidissement, l'écart maximum observé est aussi pour le bâtiment 10 est une hausse de 3.6 kWh/(m².an) entre les résultats obtenus avec E+ et ceux obtenus avec P+C.

Ceci est à mettre en perspective avec les différences de résultats de STD liées aux choix de modélisation des bâtiments, qui sont mentionnées dans la littérature. Par exemple, Liu *et al.* citent dans un article publié en 2015 [138] plusieurs études qui ont montré que la consommation énergétique d'un bâtiment peut varier de 20 à 40 % selon le choix du coefficient de transfert convectif intérieur choisi. Ils mentionnent aussi un état de l'art qui a montré que pour différents modes de calcul du coefficient de transfert convectif extérieur utilisés dans l'évaluation de la consommation énergétique de bâtiments situés en milieu urbain, l'écart relatif entre les résultats obtenus peut atteindre 80 %.

De plus, nous avons comparé les besoins énergétiques obtenus avec E+ pour la version 0 de tous les modèles, et ceux obtenus avec les hypothèses de la version 0 sans imposer de coefficients de transfert convectif constants. Ceci revient donc à utiliser les modes de calcul de ces coefficients définis par défaut dans E+. On trouvera leur description dans la documentation du logiciel¹¹, respectivement aux pages 76 (3.5.5.4 DOE-2 Model) et 95 (3.6.4.31 TARP Algorithm) pour les coefficients de transfert convectif extérieur et intérieur. Les changements les plus importants observés concernent le modèle PinED. Pour le nouveau bâtiment, l'étage 9 est le plus impacté avec une diminution des besoins de chauffage de 18 %, soit une baisse de 7 kWh/(m².an). Pour les bâtiments de l'environnement urbain, le bâtiment 18 est le plus impacté avec une diminution des besoins de chauffage de 20 %, soit une baisse de 47 kWh/(m².an).

Finalement, nous avons vu que dans certains cas les résultats issus de la STD avec la PFM sont particulièrement proches de ceux obtenus avec E+ (besoins de chauffage du bâtiment neuf), et dans d'autres cas ils sont plus proches de ceux obtenus avec P+C (besoins de refroidissement du bâtiment neuf, besoins de chauffage et de refroidissement des bâtiments existants). La PFM est donc un outil d'évaluation énergétique de bâtiments par STD qui fournit des résultats cohérents par rapport à ceux obtenus avec E+ et P+C. Ces éléments jouent en la faveur de la pertinence de la PFM car E+ et P+C sont deux logiciels de STD robustes, dont les modèles physiques ont été validés par de nombreux tests. De plus, les différences les plus fortes observées entre les besoins énergétiques obtenus avec P+C, E+ et la PFM pour la version 0 des modèles étudiés sont de l'ordre de grandeur de l'impact du changement du mode de calcul des coefficients de transfert convectif sur le bilan énergétique des bâtiments. Ces écarts, obtenus entre trois outils de STD qui diffèrent par de nombreux aspects, ne semblent donc pas aberrants. Enfin, quel que soit le modèle étudié les ordres de grandeur des besoins énergétiques obtenus avec la PFM sont - comme ceux obtenus avec E+ et P+C - cohérents avec les types de bâtiments modélisés : un bâtiment neuf de bureaux et des bâtiments anciens de logements.

11. Documentation du logiciel EnergyPlus v8.4.0, document « EngineeringReference ».

3.6 Impacts de l'enrichissement des modèles, versions 0, 1a, 1b et 2

Nous présentons ici les résultats des évaluations énergétiques des versions des quatre modèles étudiés avec les outils concernés, c'est à dire P+C, E+ et la PFM pour la version 0 ; E+ et la PFM pour les versions 1a et 1b ; la PFM pour la version 2¹². Nous comparons l'impact du passage d'une version à la suivante (versions dont les différences sont résumées dans le [tableau III.5 de la partie 3.3.5. ii\) de ce chapitre](#)) sur les besoins énergétiques calculés avec les outils concernés, ainsi que sur les temps de calcul obtenus.

3.6.1 Résultats obtenus avec les différentes versions

3.6.1. i) Temps de calcul

Dans le chapitre précédent, nous avons précisé l'importance du temps de calcul dans notre problématique. Or, le passage d'une version à la version suivante peut avoir un impact sur le temps de calcul nécessaire pour l'évaluation énergétique du modèle. Par ailleurs, pour la même version d'un même modèle les temps de calculs obtenus avec les différents outils peuvent être différents.

Le [tableau III.18](#) présente les temps de calcul obtenus avec P+C pour la version 0 des quatre modèles. Dans l'environnement logiciel de P+C, les flux solaires incidents sur les parois des bâtiments sont pré-calculés lors de l'export du modèle depuis Alcyone vers Pleiades. La STD est ensuite réalisée dans Pleiades avec le moteur de calcul COMFIE. On observe que les temps de calcul pour ces deux étapes sont identiques pour les modèles P et PwS. Le temps nécessaire à l'export du modèle d'Alcyone vers Pleiades augmente légèrement pour les modèles PinED et ED, mais pour ces modèles c'est particulièrement la STD avec COMFIE qui est plus longue.

Temps de calcul obtenus avec P+C							
P		PwS		PinED		ED	
Alcyone	COMFIE	Alcyone	COMFIE	Alcyone	COMFIE	Alcyone	COMFIE
2 s	12 s	2 s	12 s	11 s	2 min 11 s	9 s	1 min 26 s
Total		Total		Total		Total	
14 s		14 s		2 min 22 s		1 min 35 s	

Tableau III.18 – Temps de calcul obtenus pour l'évaluation énergétique de chaque modèle avec P+C (version 0).

Le [tableau III.19](#) présente les temps de calcul obtenus avec E+ pour les versions 0, 1a et 1b des quatre modèles. Pour toutes les versions, l'évaluation énergétique des modèles P et PwS est beaucoup plus rapide que celle des modèles PinED et ED. Cette différence est particulièrement marquée lorsque le calcul d'une réflexion CLO est activé, que ce soit avec un albedo du sol nul (versions 1a) ou non (version 1b). En effet, le passage de la version 0 à la version 1a provoque une faible augmentation des temps de calcul pour les modèles P et PwS, mais ceux des modèles PinED

12. E+ et P+C ont été utilisés avec un ordinateur ayant une mémoire installée de 8 Go et équipé d'un processeur Intel(R) Core(TM) i5, 2 cœurs, avec une fréquence de base de 2.00 GHz et une fréquence maximum de 2.6 GHz. La PFM a été utilisée avec un ordinateur ayant une mémoire installée de 16 Go et équipé d'un processeur Intel(R) Core(TM) i7, 6 cœurs, avec une fréquence de 2.5 GHz.

et ED sont multipliés par cinq. Les temps de calcul obtenus avec la version 1b sont similaires à ceux obtenus avec la version 1a car pour ces deux versions, E+ calcule une réflexion CLO sur toutes les surfaces. Dans la version 1a, l'albedo du sol est nul donc la réflexion CLO sur sa surface est nulle, mais le calcul est tout de même réalisé.

	Temps de calcul obtenus avec E+			
	P	PwS	PinED	ED
0	26 s	1 min 15 s	5 min 7 s	4 min 42 s
1a	42 s	1 min 40 s	25 min 42 s	20 min 2 s
1b	42 s	1 min 41 s	25 min 17 s	20 min 32 s

Tableau III.19 – Temps de calcul obtenus pour l'évaluation énergétique de chaque version de chaque modèle avec E+.

Les tableaux III.20 et III.21 présentent les temps de calculs obtenus avec la PFM pour toutes les versions des modèles P, PwS, PinED et ED. Dans la PFM, les flux solaires incidents sur les parois des bâtiments sont pré-calculés par PT_M. La STD est ensuite réalisée par Dymola. En observant ces résultats, on remarque que le pré-traitement réalisé avec PT_M est rapide et ce quelque soit le modèle considéré. En revanche, l'écart entre les temps de pré-traitement obtenus pour les différentes versions est plus important pour les modèles PinED et ED que pour les modèles P et PwS. Ceci vient du calcul des flux solaires incidents sur les parois des zones thermiques étudiées, qui est effectué lors de cette étape de pré-traitement. Pour les modèles PinED et ED, de nombreux bâtiments séparés les uns des autres sont étudiés donc l'activation des réflexions CLO augmente la complexité des calculs que PT_M doit réaliser.

Par ailleurs, le temps de calcul lié à la STD avec Dymola est quasiment identique pour les modèles P et PwS (entre 1 et 2 min) mais il atteint 10 h pour le modèle ED et 13 h pour le modèle PinED. Ceci vient du fait qu'avec Dymola le temps de calcul augmente très fortement au-delà d'un certain niveau de complexité du modèle étudié.

	Temps de calcul obtenus avec la PFM					
	P			PwS		
	PT_M	Dymola	Total	PT_M	Dymola	Total
0	< 1 s	1 min 24 s	1 min 24 s	< 1 s	1 min 22 s	1 min 22 s
1a	1 s	1 min 36 s	1 min 37 s	3 s	1 min 20 s	1 min 23 s
1b	2 s	1 min 44 s	1 min 46 s	3 s	1 min 20 s	1 min 23 s
2	3 s	1 min 39 s	1 min 42 s	7 s	1 min 18 s	1 min 25 s

Tableau III.20 – Temps de calcul obtenus pour l'évaluation énergétique de chaque version des modèles P et PwS avec la PFM.

En observant les temps de calcul présentés dans cette partie, si on souhaite connaître uniquement le bilan énergétique du bâtiment neuf en prenant en compte son environnement urbain, le modèle PwS est beaucoup plus intéressant que le modèle PinED. Cependant, nous allons voir par la suite que la modélisation simplifiée de l'environnement urbain dans le modèle PwS a une influence sur les besoins énergétiques du nouveau bâtiment, qui peuvent être différents de ceux obtenus avec le modèle PinED.

	Temps de calcul obtenus avec la PFM					
	PinED			ED		
	PT_M	Dymola	Total	PT_M	Dymola	Total
0	6 s	13 h	13 h	5 s	10 h	10 h
1a	24 s	13 h	13 h	18 s	10 h	10 h
1b	37 s	13 h	13 h	30 s	10 h	10 h
2	78 s	13 h	13 h	61 s	10 h	10 h

Tableau III.21 – Temps de calcul obtenus pour l'évaluation énergétique de chaque version des modèles PinED et ED avec la PFM.

On remarque aussi qu'en l'état actuel de développement de la PFM, l'évaluation énergétique des modèles PinED et ED en version 1b est environ 30 fois plus rapide avec E+ qu'avec la PFM. Néanmoins, la PFM est en cours de développement et un travail de réduction de modèles en cours chez EDF R&D va permettre de réduire drastiquement les temps de STD avec Dymola, en particulier pour les modèles les plus complexes comme PinED. Nous reviendrons sur ce point dans la [partie 2.2.2. ii\) du chapitre IV](#).

3.6.1. ii) Besoins énergétiques du bâtiment neuf

- Résultats pour les modèles P et PinED

Le [tableau III.22](#) rappelle les besoins énergétiques du bâtiment neuf pour les différentes versions des modèles P et PinED, obtenus par STD avec les outils concernés. On remarque que l'évolution des besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment neuf obtenus de la version 0 à la version 1a, puis de la 1a à la 1b, est similaire pour E+ et la PFM, et ce aussi bien pour le modèle P que pour le modèle PinED. L'illustration graphique de l'évolution des besoins énergétiques du bâtiment neuf en passant d'une version à la suivante, que nous proposons sur la [figure III.15](#), ne concerne que les résultats issus de la STD des modèles P et PinED avec la PFM. Ceci permet par ailleurs d'illustrer les conséquences de la prise en compte de trois réflexions CLO au lieu d'une sur toutes les surfaces extérieures (passage à la version 2), qui n'est possible qu'avec la PFM.

	Besoins de chauffage						Besoins de refroidissement					
	P			PinED			P			PinED		
	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM
0	34.2	27.3	29.3	37.4	29.7	32.3	28.2	21.1	37.4	22.1	16.0	28.6
1a		26.8	28.6		28.1	30.0		22.4	40.0		21.0	37.8
1b		25.2	26.6		27.6	29.6		29.6	51.3		22.9	40.2
2			26.2			27.4			53.2			53.5

Tableau III.22 – Rappel des besoins énergétiques [kWh/(m².an)] du bâtiment neuf obtenus pour chaque version des modèles P et PinED, avec les outils concernés.

On observe que l'activation du calcul d'une réflexion CLO sur toutes les surfaces sauf le sol (passage de la version 0 à la version 1a) avec la PFM entraîne une diminution des besoins de chauffage ([figure III.15 \(a\)](#)) et une augmentation des besoins de refroidissement ([figure III.15 \(b\)](#)). Cette modification a un impact plus important sur les besoins énergétiques du nouveau bâtiment

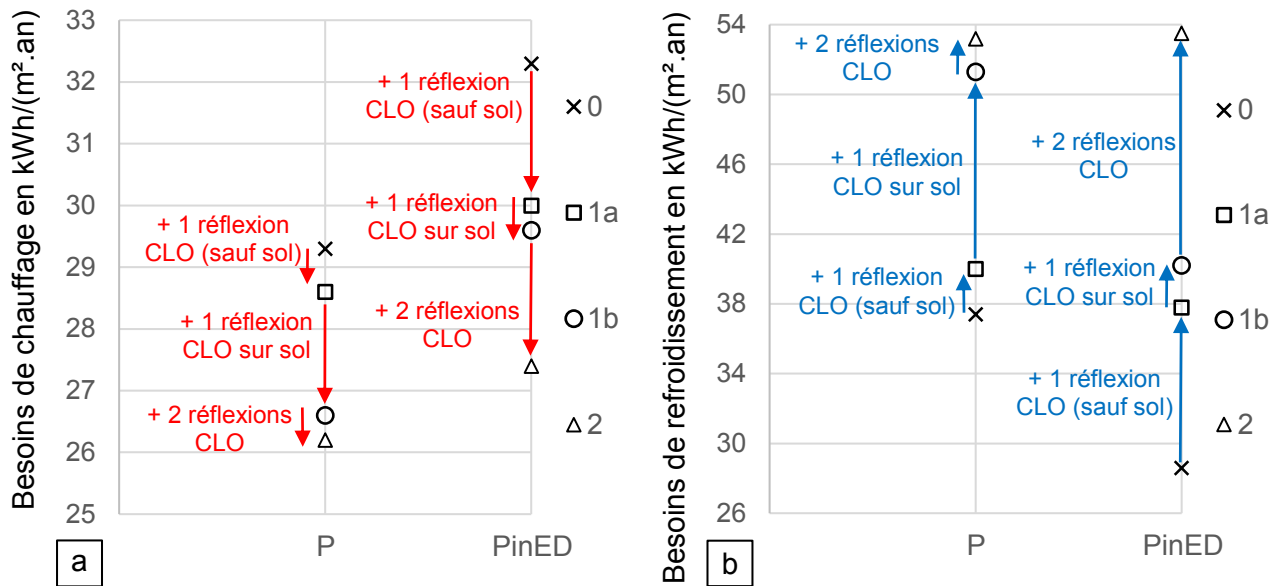


Figure III.15 – Comparaisons des besoins de chauffage (a) et de refroidissement (b) du bâtiment neuf obtenus avec la PFM pour les différentes versions des modèles P et PinED.

dans le modèle PinED que dans le modèle P. Ces différences sont cohérentes. En effet, dans le modèle P - bâtiment neuf seul - les seules surfaces (hormis le sol) qui peuvent réfléchir le rayonnement CLO sur les surfaces extérieures du bâtiment neuf sont les brise-soleil verticaux ainsi que, au niveau des étages comportant un balcon, les surfaces horizontales des étages supérieur et inférieur visibles par la façade sud en retrait. En revanche dans le modèle PinED - bâtiment neuf entouré des bâtiments existants - toutes les surfaces extérieures des bâtiments de l'environnement urbain qui « voient » les façades du nouveau bâtiment peuvent réfléchir ce rayonnement sur ces dernières. On note par ailleurs que pour le modèle PinED, l'écart entre les besoins de refroidissement obtenus entre les deux versions est très largement supérieur à celui observé entre les besoins de chauffage. Ceci peut venir du fait qu'en été la course du soleil est plus haute dans le ciel qu'en hiver, donc les ombres portées sur les bâtiments existants sont plus faibles. Par conséquent, la quantité de rayonnement CLO qui atteint les parois de ces bâtiments est plus importante et la quantité de rayonnement CLO réfléchi en direction du bâtiment neuf aussi.

La prise en compte d'une réflexion CLO sur le sol en augmentant son albedo de 0 à 0.2 (passage de la version 1a à la version 1b) avec la PFM provoque aussi une diminution des besoins de chauffage et une augmentation des besoins de refroidissement. Cette modification des besoins énergétiques du bâtiment neuf est beaucoup plus nette pour le modèle P que pour le modèle PinED. Ceci est logique car les ombres portées par les bâtiments sur le sol sont prises en compte dans la PFM. Or dans le modèle PinED le sol autour du nouveau bâtiment est beaucoup plus souvent ombragé que dans le modèle P, en raison des ombres portées par les bâtiments existants. Dans PinED il y a donc beaucoup moins de rayonnement CLO incident sur le sol et réfléchi par ce dernier sur les façades du bâtiment neuf. Pour le modèle P en particulier, on observe que l'augmentation des besoins de refroidissement est beaucoup plus prononcée que la diminution des besoins de chauffage. Ceci peut

s'expliquer par le fait qu'en été le soleil éclaire le sol plus longtemps chaque jour qu'en hiver, il y a donc d'avantage de rayonnement CLO réfléchi par le sol vers le bâtiment neuf en été qu'en hiver.

Comme pour les changements de version précédents, l'ajout de deux réflexions CLO sur toutes les surfaces extérieures du quartier (passage de la version 1b à la version 2) avec la PFM induit une diminution des besoins de chauffage et une augmentation des besoins de refroidissement du bâtiment neuf. Une fois de plus, ces impacts sont plus prononcés pour le modèle PinED que pour le modèle P, particulièrement pour les besoins de refroidissement. On peut formuler ici la même analyse que pour le passage de la version 0 à la version 1a.

Enfin, en comparant les résultats obtenus pour les versions 0 et 2 on constate que la prise en compte de trois réflexions CLO au lieu d'aucune sur le sol, les parois extérieures des bâtiments et les protections solaires a un impact majeur sur le bilan énergétique du bâtiment neuf. Ceci est particulièrement vrai en été. En effet, les besoins de refroidissement obtenus avec la PFM pour la version 2 des modèles P et PinED sont supérieurs de 42 et 87 % (respectivement) à ceux obtenus avec la version 0. Pour les besoins de chauffage, on obtient une diminution de 10 % pour le modèle P et de 15 % pour le modèle PinED en activant le calcul de trois inter-réflexions solaires dans la PFM.

- Comparaison entre les modèles PinED et PwS

Le [tableau III.23](#) rassemble les besoins énergétiques du bâtiment neuf obtenus pour les versions 1a, 1b et 2 des modèles PwS et PinED. Les différences entre les deux modèles pour les résultats obtenus avec la version 0 sont négligeables, donc nous ne les présentons pas ici. Le [tableau III.24](#) donne l'écart absolu entre les résultats obtenus pour une version et ceux obtenus pour la version suivante.

	Besoins de chauffage				Besoins de refroidissement			
	PwS		PinED		PwS		PinED	
	E+	PFM	E+	PFM	E+	PFM	E+	PFM
1a	27.7	27.9	28.1	30.0	22.1	45.4	21.0	37.8
1b	27.3	27.5	27.6	29.6	23.8	48.0	22.8	40.2
2		24.8		27.4		62.2		53.5

Tableau III.23 – Besoins énergétiques [kWh/(m².an)] du bâtiment neuf obtenus avec E+ et la PFM pour les versions 1a, 1b, et 2 des modèles PwS et PinED.

	PinED - PwS			
	Besoins de chauffage		Besoins de refroidissement	
	E+	PFM	E+	PFM
1a	+ 0.3	+ 2.1	- 1.1	- 7.6
1b	+ 0.3	+ 2.1	- 0.9	- 7.8
2		+ 2.6		- 8.7

Tableau III.24 – Ecart absolu [kWh/(m².an)] entre les besoins énergétiques du bâtiment neuf obtenus avec les modèles PwS et PinED, pour les versions 1a, 1b et 2.

Pour la version 1a (une réflexion CLO prise en compte sur toutes les surfaces extérieures sauf le sol), on observe que le passage du modèle PwS au modèle PinED provoque une augmentation des besoins de chauffage et une diminution des besoins de refroidissement du nouveau bâtiment. Autrement dit, par rapport au modèle PinED, le modèle PwS sous-estime les besoins de chauffage et sur-estime les besoins de refroidissement. La seule différence entre la version 0 (pour laquelle il n'y a pas de différence entre les deux modèles) et la version 1a est la prise en compte d'une réflexion CLO sur les surfaces extérieures des bâtiments. Dans le modèle PwS, les bâtiments de l'environnement urbain sont modélisés sans surface vitrée, tandis que dans le modèle PinED les façades de ces bâtiments qui font face au bâtiment neuf comportent 30 % de surface vitrée. Or, les façades des bâtiments existants réfléchissent 90 % du rayonnement CLO qu'elles reçoivent (leur albedo est de 0.9 dans PinED et les masques solaires du modèle PwS ont été modélisés avec la même caractéristique) tandis que les surfaces vitrées de ces bâtiments n'en réfléchissent que 41 % (elles ont un facteur solaire de 0.59). La réflexion du rayonnement CLO sur les façades des bâtiments de l'environnement urbain et vers celles du nouveau bâtiment est donc plus forte dans le modèle PwS que dans le modèle PinED.

Les écarts absolus entre les résultats obtenus pour les modèles PwS et PinED sans (version 1a) et avec (version 1b) réflexion CLO sur le sol sont très proches ([tableau III.24](#)), car les interactions entre les bâtiments et le sol sont les mêmes dans les deux modèles. En revanche, ces écarts augmentent en prenant en ajoutant deux réflexions CLO sur toutes les surfaces extérieures de la scène (passage de la version 1b à la version 2). En effet, cette modification accentue l'impact (décrit ci-dessus pour la version 1a) de l'absence de surface vitrée sur les masques solaires représentant les bâtiments existants dans le modèle PwS.

En conclusion, la modélisation de l'environnement urbain d'un bâtiment sous forme de bâtiments sans fenêtre induit une sous-estimation et une sur-estimation des besoins de chauffage et de refroidissement (respectivement) obtenus par STD du bâtiment avec un logiciel prenant en compte au moins une réflexion CLO sur les parois verticales. Cependant, la modélisation des surfaces vitrées des bâtiments constituant un îlot urbain peut s'avérer fastidieuse. Si les utilisateurs de tels logiciels ne veulent pas s'atteler à cette tâche, nous leur conseillons de prendre pour albedo des parois verticales des bâtiments existants une moyenne de l'albedo de leurs parois opaques et de celui de leurs vitrages (pondérée par le pourcentage de surface vitrée).

3.6.1. *iii) Besoins énergétiques des bâtiments existants*

- *Résultats agrégés du quartier entier*

Le [tableau III.25](#) rappelle les besoins énergétiques de l'ensemble des bâtiments de l'environnement urbain pour chaque version des modèles ED (bâtiments existants avant intégration du bâtiment neuf) et PinED (bâtiments existants après intégration du bâtiment neuf), obtenus par STD avec les outils concernés. Le [tableau III.26](#) donne l'écart absolu entre les résultats obtenus pour une version et ceux obtenus pour la version suivante.

	Besoins de chauffage						Besoins de refroidissement					
	ED			PinED			ED			PinED		
	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM	P+C	E+	PFM
0	151.6	174.8	155.2	152.2	175.8	156.3	3.3	0.4	2.8	3.0	0.4	2.4
1a		171.8	152.4		172.9	153.7		0.7	3.6		0.6	3.1
1b		170.8	151.2		172.0	152.6		0.8	4.1		0.7	3.6
2			147.2			148.7			5.9			5.1

Tableau III.25 – Besoins énergétiques [kWh/(m².an)] de l'ensemble des bâtiments existants obtenus pour chaque version des modèles ED et PinED, avec les outils concernés.

	Besoins de chauffage				Besoins de refroidissement			
	ED		PinED		ED		PinED	
	E+	PFM	E+	PFM	E+	PFM	E+	PFM
1a – 0	- 3.0	- 2.9	- 2.9	- 2.6	+ 0.2	+ 0.9	+ 0.2	+ 0.7
1b – 1a	- 1.0	- 1.2	- 0.9	- 1.1	+ 0.1	+ 0.5	+ 0.1	+ 0.4
2 – 1b		- 4.0		- 3.9		+ 1.8		+ 1.5
2 – 0		- 8.1		- 7.6		+ 3.1		+ 2.7

Tableau III.26 – Ecart absolu [kWh/(m².an)] entre les besoins énergétiques de l'ensemble des bâtiments existants obtenus pour chaque version des modèles ED et PinED, avec les outils concernés.

Ces résultats montrent que le passage d'une version à la suivante provoque une diminution des besoins de chauffage et une augmentation des besoins de refroidissement, pour les mêmes raisons que celles évoquées au paragraphe précédent concernant le bâtiment neuf. Ces écarts entre versions sont plus faibles que ceux observés pour le nouveau bâtiment. Ceci peut s'expliquer par la disposition des bâtiments existants au sein de cet îlot à forte densité urbaine. En effet, contrairement au bâtiment neuf dont les quatre façades donnent sur l'extérieur, tous les bâtiments de l'environnement urbain ont au moins une (et souvent plus) façade mitoyenne qui ne reçoit donc aucun rayonnement CLO. Ils sont donc moins sensibles à la modification du calcul des échanges CLO entre les surfaces extérieures du quartier.

Les écarts obtenus pour le modèle ED sont similaires à ceux obtenus pour le modèle PinED. Pour le passage de la version 1a à la version 1b (augmentation de la valeur de l'albédo de 0 à 0.2), ceci signifie que l'intégration du nouveau bâtiment dans le quartier a une faible influence sur la réflexion des rayonnements CLO sur le sol. Ce résultat n'est pas surprenant étant donné que le sol est déjà fortement ombragé par les bâtiments existants. Pour le passage de la version 0 à la version 1a (ajout d'une réflexion CLO sur toutes les surfaces extérieures sauf le sol), ainsi que le passage de la version 1b à la version 2 (ajout de deux réflexions CLO sur toutes les surfaces extérieures), la proximité des résultats obtenus pour ED et PinED montrent que l'insertion du bâtiment neuf parmi les bâtiments existants n'a pas un fort impact sur les réflexions CLO dans ce quartier.

Pour les deux modèles, les passages de la version 0 à la version 1a et de la version 1b à la version 2 ont plus d'impact sur les besoins énergétiques du quartier que le passage de la version 1a à la version 1b. Ceci s'explique par la forte densité urbaine du quartier étudié : les ombres portées sur le sol y sont importantes, ce qui diminue l'impact de l'albédo du sol sur les besoins énergétiques

des bâtiments. De plus, les bâtiments sont proches les uns des autres donc la probabilité pour que les rayonnements CLO réfléchis par leurs parois atteignent celles des bâtiments voisins est forte. Enfin, la comparaison entre les résultats obtenus avant et après ajout du calcul de trois réflexions CLO sur toutes les surfaces (passage de la version 0 à la version 2, dernière ligne du [tableau III.26](#) ou première et dernière lignes du [tableau III.25](#)) montre que cette modification impacte de façon nette le bilan énergétique de l'ensemble des bâtiments existants, en particulier pour ses besoins de refroidissement qui sont plus que doublés.

Ces observations sont basées sur des résultats agrégés de l'ensemble des bâtiments de l'environnement urbain. Le paragraphe suivant présente quelques résultats pour chacun de ces bâtiments.

- Résultats par bâtiment avec la PFM

Les figures [III.16](#) et [III.17](#) donnent respectivement les besoins de chauffage et de refroidissement de chacun des bâtiments existants pour chacune des versions du modèle PinED, obtenus avec la PFM. Nous ne montrons pas les graphiques équivalents pour le modèle ED ni pour les résultats obtenus avec E+, étant donné que les tendances sont les mêmes que celles présentées ici.

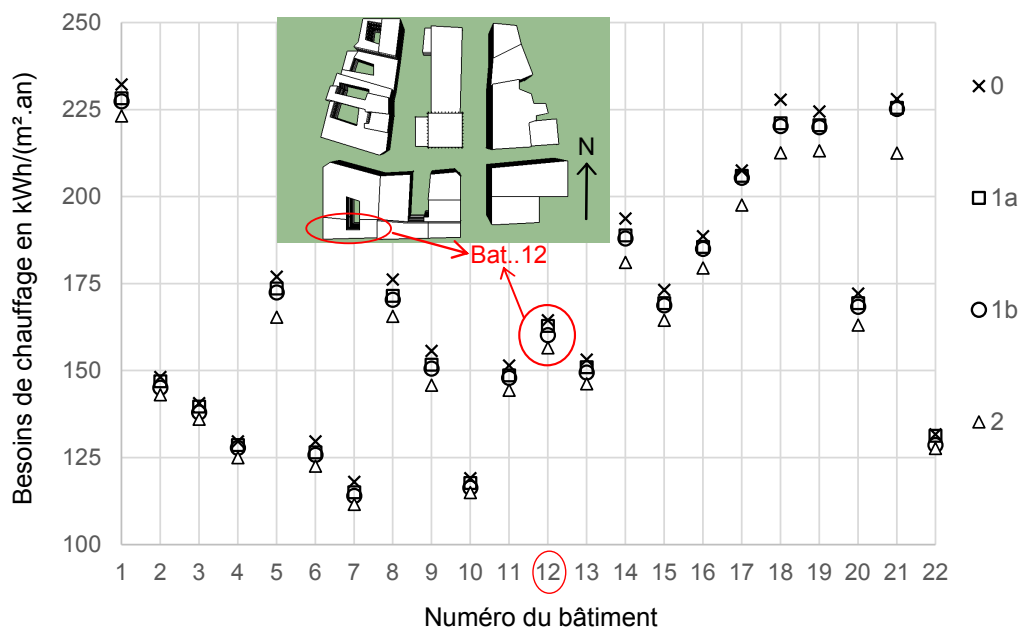


Figure III.16 – Besoins de chauffage des bâtiments existants obtenus avec la PFM pour les différentes versions du modèle PinED.

Comme pour l'ensemble du quartier, on remarque que pour la plupart des bâtiments de l'environnement urbain, la prise en compte d'une réflexion CLO sur toutes les surfaces sauf le sol (passage de la version 0 à la version 1a) puis de trois réflexions CLO au lieu d'une sur toutes les surfaces (passage de la version 1b à la version 2) ont plus d'impact sur leurs besoins énergétiques que l'ajout d'une réflexion CLO sur le sol (passage de la version 1a à la version 1b). Ceci est particulièrement notable pour les besoins de refroidissement. Les bâtiments pour lesquelles cette observation n'est pas valable sont dans une situation particulière.

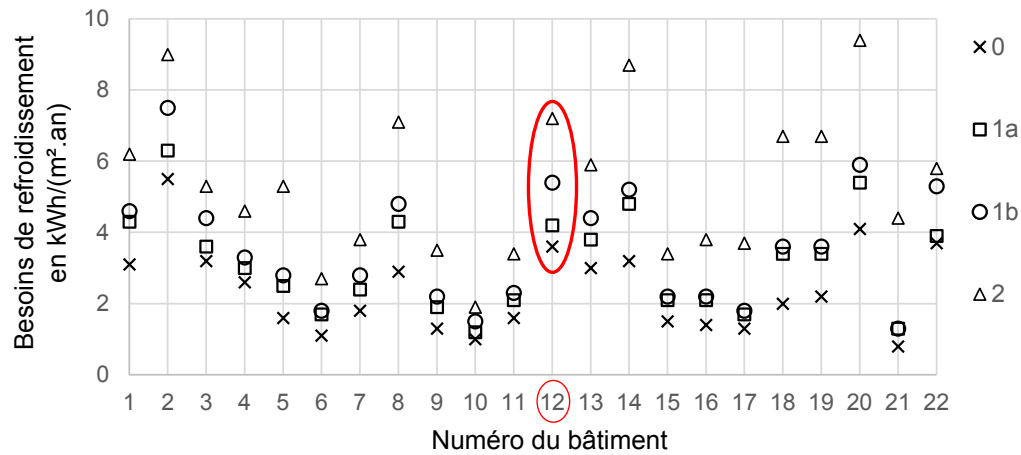


Figure III.17 – Besoins de refroidissement des bâtiments existants obtenus avec la PFM pour les différentes versions du modèle PinED.

Par exemple, les façades du bâtiment 12 (repéré sur la figure III.16) « voient » davantage le sol que les parois des bâtiments environnants, et les portions de sol vues par ces façades sont peu ombragées par l’environnement urbain modélisé. Dans ce cas, la prise en compte d’une réflexion CLO sur le sol lors du passage de la version 1a à la version 1b a plus d’impact sur les besoins énergétiques du bâtiment que l’activation d’une réflexion CLO sur les parois des bâtiments (passage de la version 0 à la version 1a). En revanche pour ce bâtiment l’ajout de deux réflexions CLO sur toutes les surfaces extérieures (passage de la version 1a à la version 2) a un impact net sur ses besoins énergétiques, car le sol fait partie de ces surfaces. Ceci se remarque particulièrement pour l’évolution des besoins de refroidissement d’une version à l’autre, illustrée par la figure III.17.

3.6.2 Commentaires

Les résultats présentés dans cette partie ont mis en évidence l’influence importante de la prise en compte des réflexions CLO (sur le sol, les parois extérieures des bâtiments et les protections solaires) sur le bilan énergétique des bâtiments étudiés. En ce sens, l’évaluation énergétique à l’échelle quartier semble plus pertinente avec E+ et la PFM, qui - contrairement à P+C - permettent tous les deux de prendre en compte une réflexion CLO sur le sol et les surfaces extérieures des bâtiments. Pour renforcer ceci, nous avons aussi vu que la prise en compte des ombres portées par les bâtiments sur le sol - possible avec E+ et la PFM mais pas avec P+C - est importante dans ce contexte. Par ailleurs, le passage d’une à trois réflexions CLO sur toutes les surfaces extérieures de la scène modifie également le bilan énergétique des bâtiments. Ceci souligne l’intérêt de la démarche mise en œuvre dans le projet MERUBBI, la PFM étant le seul des trois outils étudiés à offrir cette fonctionnalité.

Enfin, nous avons vu que la STD du bâtiment neuf en prenant en compte son environnement urbain est beaucoup plus rapide avec le modèle PwS qu’avec le modèle PinED, en particulier avec E+ et la PFM. Cependant, la comparaison des résultats obtenus avec les deux modèles montre que dans le modèle PwS les besoins de chauffage du nouveau bâtiment sont sous-estimés et ceux de refroidissement sont sur-estimés. Le modèle PinED permet donc d’obtenir un bilan énergétique plus réaliste du bâtiment neuf, sauf si la valeur de l’albedo des parois des bâtiments existants est

corrigée pour prendre en compte l'albedo des vitrages dans le modèle PwS. De plus, contrairement au modèle PwS, PinED permet d'évaluer les impacts de l'intégration du nouveau bâtiment sur le bilan énergétique des bâtiments environnants comme nous l'avons vu dans [la partie 3.4.1 de ce chapitre](#).

4 Synthèse △

Le début de ce chapitre a été dédié à la présentation de l'architecture et du fonctionnement de la plateforme MERUBBI (PFM). Les possibilités offertes par la PFM, dont certaines sont en cours d'implémentation, font d'elle un outil capable d'apporter des réponses intéressantes aux besoins d'aide à la conception des projets de densification urbaine que nous avons décrits dans le chapitre II.

Dans [la partie 3 de ce chapitre III](#), nous avons présenté les résultats de l'évaluation énergétique du projet de densification urbaine « Strasbourg Dense » menée simultanément avec Pleiades+COMFIE (P+C), EnergyPlus (E+) et la PFM. Dans une première phase, nous avons montré que la PFM peut être utilisée efficacement pour évaluer les impacts de l'environnement urbain sur le bilan énergétique du bâtiment neuf, ainsi que les conséquences de l'implantation du nouveau bâtiment sur les besoins énergétiques des bâtiments existants. En particulier, la considération de trois inter-réflexions CLO sur toutes les surfaces permet une analyse précise de ces interactions, qui ont des impacts énergétiques non négligeables. Les réflexions CLO ne pouvant pas être prises en compte dans P+C, et E+ étant limité au calcul d'une réflexion CLO sur toutes les surfaces, la PFM est de ce point de vue un outil d'évaluation de projets de densification urbaine plus pertinent que ces deux logiciels.

Nous avons ensuite comparé les résultats obtenus avec ces trois outils pour la version 0 des quatre modèles étudiés, c'est à dire sans prise en compte d'aucune réflexion CLO sur aucune surface. Au regard des besoins énergétiques obtenus avec E+ et P+C - outils de STD reconnus et rigoureusement validés - ceux issus des simulations réalisées avec la PFM sont cohérents, même si on observe des écarts importants entre certains résultats.

Une troisième phase a consisté à comparer les impacts énergétiques de la prise en compte progressive des réflexions CLO sur le sol et les surfaces des bâtiments. Nous avons pu constater des différences non négligeables entre les besoins énergétiques obtenus avec la version 0 et avec les versions suivantes, dans lesquelles sont successivement activées la prise en compte d'une réflexion CLO sur les parois des bâtiments (version 1a) ainsi que sur le sol (version 1b). Ceci montre l'intérêt d'utiliser des outils comme E+ et la PFM, capables de prendre en compte ces phénomènes physiques, pour l'évaluation de projets de densification urbaine. Par ailleurs, le passage d'une à trois réflexions CLO sur toutes les surfaces extérieures de la scène urbaine (c'est à dire de la version 1b à la version 2) modifie de façon significative les besoins énergétiques des bâtiments étudiés. En revanche, des tests supplémentaires réalisés par EDF R&D dans lesquels six réflexions CLO étaient prises en compte ont donné des résultats quasiment identiques à ceux obtenus avec trois réflexions

CLO. Cela montre qu'aller jusqu'à ce niveau de détail n'est pas nécessaire, tandis que passer d'une à trois réflexions CLO est pertinent. Ici encore, cette dernière fonctionnalité n'étant offerte que par la PFM, cet outil semble permettre de réaliser des évaluations énergétiques à l'échelle du quartier plus justes que celles effectuées par E+ et P+C.

Ce sentiment est renforcé par la possibilité de calculer les échanges radiatifs GLO entre les surfaces extérieures des bâtiments qui est en cours de développement dans la PFM et absente chez E+ et P+C. Ce calcul se fait par la méthode des radiosités. Plus précisément, il s'agit de calculer les radiosités de toutes les surfaces mises en jeu dans le modèle considéré. La radiosité d'une surface représente la puissance radiative qui la quitte et est la somme d'un terme d'émission et d'un terme de réflexion. Dans le cadre du projet MERUBBI, EDF R&D a tout d'abord calculé ces radiosités *via* des circuits électriques équivalents implémentés en langage Modelica. Cette technique a été appliquée sur une maquette composée de 5 bâtiments sans aucune surface vitrée, représentant au total 11 zones thermiques. Pour ce modèle, l'activation du calcul des échanges radiatifs GLO multiplie le temps de simulation par 20. Cette très forte augmentation a poussé les chercheurs d'EDF R&D à tester une autre méthode de calcul des radiosités, cette fois par résolution d'un système d'équations matriciel. Sur le même cas d'étude que précédemment, l'activation du calcul des échanges GLO avec cette nouvelle technique permet de ne multiplier que par 4 le temps de simulation. Par conséquent, c'est probablement cette dernière méthode qui sera retenue pour le calcul des échanges radiatifs GLO dans la PFM. En ce début d'été 2017 la robustesse de cette méthode n'a pas encore été démontrée et aucun test n'a été réalisé sur les modèles de « Strasbourg Dense », or le modèle PinED est beaucoup plus complexe (23 bâtiments et 54 zones thermiques) que le cas d'étude mentionné ci-dessus. La prise en compte des échanges radiatifs GLO entre les surfaces extérieures des bâtiments dans les modèles ED, P, PwS et PinED constituerait une « version 3 ». La simulation de cette version est prévue à court terme dans le projet MERUBBI, tout comme la comparaison des résultats obtenus avec ceux issus des STD réalisées avec les versions 0, 1a, 1b et 2.

Si l'évaluation du projet de densification urbaine ne visait qu'à quantifier aussi précisément que possible les besoins énergétiques du nouveau bâtiment, on pourrait penser que le modèle PwS (bâtiment neuf entouré des bâtiments existants modélisés comme des masques solaires) est idéal. En effet, ce modèle permet d'évaluer le bilan énergétique du bâtiment neuf en prenant en compte son environnement urbain et nous avons vu dans [la partie 3.6.1. i\) de ce troisième chapitre](#) que les temps de calcul liés à cette évaluation sont beaucoup plus faibles que ceux observés pour le modèle PinED. Néanmoins, nous avons remarqué dans [la partie 3.6.1. ii\)](#) que plus on prend en compte de réflexions CLO sur les surfaces extérieures du quartier, plus les besoins de chauffage (respectivement de refroidissement) obtenus avec PwS sont sous-estimés (respectivement sur-estimés) par rapport à ceux obtenus avec PinED. Ces différences pourraient être atténuées grâce à une estimation d'un albedo moyen des parois des masques solaires dans PwS, tenant compte des différences de réflexion solaire entre les parois opaques et les vitrages. Cependant, l'estimation des impacts de l'intégration du bâtiment neuf sur le bilan énergétique des bâtiments existants est importante pour évaluer la pertinence globale du projet de densification. Cette estimation est permise avec PinED mais pas avec PwS.

Dans le chapitre IV, nous introduisons tout d'abord des techniques de réduction des temps de calcul liés à la STD, qui comme nous avons vu dans ce troisième chapitre peuvent être conséquents pour des modèles de quartier. Nous détaillons en particulier une méthode de réduction de la période de simulation que nous avons développée. Nous présentons ensuite comment une méthode d'optimisation multicritère par algorithme génétique utilisant un outil de STD peut aider à la conception d'un projet de densification d'un quartier à forte densité urbaine. Le cas d'étude utilisé est le modèle PinED du projet « Strasbourg Dense », préféré au modèle PwS pour les raisons évoquées ci-dessus. D'après ce que nous avons vu dans ce troisième chapitre, pour l'instant E+ est celui des trois outils étudiés qui offre le meilleur compromis entre la précision de l'évaluation énergétique réalisée et le temps de calcul qui lui est associé. De plus, le processus d'optimisation multicritère utilisant la PFM pour la STD n'est pas encore opérationnel. C'est donc E+ qui est utilisé comme outil de STD dans ce quatrième chapitre. Nous gardons tout de même à l'esprit que les temps de calcul indiqués pour la PFM ne sont pas figés et pourront être considérablement réduits dans les prochains mois, grâce aux méthodes citées en première partie. A travers les exemples présentés dans le prochain chapitre, nous explorons des possibilités d'optimisation qui ne sont pas prévues pour l'instant dans la PFM pour voir s'il serait pertinent de les intégrer. Nous détaillons aussi les caractéristiques des problèmes d'optimisation que la PFM devrait être capable de traiter à court terme. Des pistes d'amélioration de la méthode d'optimisation sont ensuite développées.

Capacités actuelles et pistes d'amélioration de la méthode d'optimisation de la conception

Table des matières

1	Introduction	114
2	Diminution des temps de calcul	115
2.1	Réduction de la période de simulation	116
2.1.1	Introduction.	116
2.1.2	Regroupement des journées par groupes : technique du k-means clustering	117
2.1.3	Construction de la séquence réduite	119
2.1.4	Evaluation de la qualité de la séquence réduite obtenue.	124
2.2	Perspectives de développement	128
2.2.1	Réduction de la période de simulation d'un projet de densification urbaine en vue de l'optimisation multicritère de sa conception	128
2.2.2	Autres pistes pour la réduction du temps de calcul.	129
3	Application de la méthode d'optimisation au projet « Strasbourg Dense » et pistes de développement	132
3.1	Présentation des problèmes d'optimisation considérés	132
3.1.1	Espace des possibles	132
3.1.2	Paramétrage de l'algorithme.	134
3.2	Résultats des optimisations réalisées en couplant E+ et NSGA-II	138
3.2.1	Minimisation des besoins énergétiques.	138
3.2.2	Prise en compte de l'éclairage naturel	149
3.2.3	Commentaires.	156
3.3	Développements en cours au sein du projet MERUBBI	158
3.3.1	Espace des possibles	158
3.3.2	Optimisation énergétique et bioclimatique.	159
3.3.3	Vers l'intégration de la performance économique	161
3.4	Pistes pour enrichir le dialogue avec les utilisateurs	162
3.4.1	Traitement automatique des résultats des optimisations.	162
3.4.2	Algorithme génétique interactif.	164
4	Synthèse	166

1 Introduction



Au cours du chapitre précédent, nous avons montré que la prise en compte des réflexions solaires sur les surfaces extérieures d'un quartier a un impact non négligeable sur les besoins énergétiques des bâtiments qui le composent. Le logiciel EnergyPlus (E+) permet de prendre en compte une réflexion CLO sur le sol, les parois des bâtiments et les protections solaires. Dans la plateforme MERUBBI (PFM), il est possible de choisir le nombre d'inter-réflexions CLO que l'on souhaite calculer sur les surfaces de la scène urbaine.

Il est donc pertinent d'utiliser E+ ou la PFM pour l'optimisation de projets de densification urbaine. Pour optimiser la conception du bâtiment neuf en prenant en compte son impact sur l'environnement urbain existant, il faut étudier le modèle complet du bâtiment neuf entouré des bâtiments existants (PinED dans le cas du projet « Strasbourg Dense »). Nous avons vu dans [la partie 3.6.1. i\) du chapitre III](#) que la STD du modèle PinED se fait en 25 min avec E+ (version 1b, avec une réflexion CLO sur toutes les surfaces) et en 13 h avec la PFM (toutes versions). Sachant qu'un processus d'optimisation multicritère par algorithme génétique nécessite généralement l'évaluation de plusieurs centaines d'individus, on voit qu'optimiser un projet de densification urbaine en utilisant E+ (et *a fortiori* la PFM) pour évaluer chaque individu par STD va être très chronophage.

La première partie de ce chapitre est donc consacrée aux possibilités de diminution des temps de calcul liés à l'évaluation des projets de densification urbaine par STD. En particulier, nous détaillons une méthode de réduction de la période de simulation que nous avons développée. Appliquée à la STD avec E+, cette technique pourrait aussi permettre de diminuer considérablement les temps de simulation des modèles de grande taille avec la PFM, ce qui la rendrait plus adéquate pour réaliser des optimisations.

Nous présentons ensuite comment une méthode d'optimisation multicritère peut permettre d'aider à la conception d'un projet de densification d'un quartier à forte densité urbaine, en l'occurrence « Strasbourg Dense », en utilisant E+ pour la STD des bâtiments. Nous avons choisi E+ plutôt que la PFM pour deux raisons. Premièrement, E+ est actuellement beaucoup plus rapide que la PFM pour réaliser une STD d'un modèle de quartier en prenant en compte au moins une réflexion CLO sur toutes les surfaces extérieures. Deuxièmement, dans la PFM le couplage entre l'algorithme génétique et les briques d'évaluation énergétique, économique et bioclimatique n'est pas encore finalisé.

Les exemples exposés dans cette deuxième partie mettent l'accent sur les possibilités offertes par E+ qui ne sont pas prévues actuellement dans la PFM, afin de montrer l'intérêt qu'elles présentent. Les particularités de la PFM sont mentionnées pour souligner ce qu'elle pourra apporter lorsque son développement sera plus avancé. Nous esquissons aussi des perspectives de développement de la méthode d'optimisation afin d'aller plus loin dans l'implication des utilisateurs et d'améliorer le service qui leur est rendu.

2 Diminution des temps de calcul △

Les problèmes d'optimisation multicritère de la conception de projets de densification urbaine comportent de nombreuses variables et nécessitent la STD de modèles complexes. Ce sont donc des problèmes numériques de grandes tailles. La résolution de tels problèmes demande un temps de calcul considérable. Il existe de nombreuses pistes pour le limiter, ce qui constitue un enjeu important comme nous l'avons expliqué à plusieurs reprises dans le [chapitre II](#) de cette thèse.

On peut tout d'abord chercher à « réduire » les modèles de bâtiments, qui « sont caractérisés par une grande complexité géométrique, des séquences de simulation sur de longues périodes et des sollicitations très fluctuantes (données météorologiques, occupation) »¹. La littérature est riche en proposition de méthodes de réduction de la complexité de ces modèles. La partie 2.4.1 du « Livre blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments » [139] répertorie les plus courantes.

Une autre approche consiste à paralléliser les calculs. Par exemple, dans le cas d'une optimisation multicritère par algorithme génétique, la simulation en parallèle de différents individus d'une même population permettrait de diminuer les temps de calcul à chaque génération. Cependant, le bénéfice de cette parallélisation dépend directement des performances de l'ordinateur utilisé. En effet, le nombre de simulations réalisables en parallèle correspond au nombre de cœurs physiques du processeur. De plus, certains logiciels ne sont pas compatibles avec la technologie « multi-cœur ».

La réduction de la durée de la période simulée est un levier puissant de diminution des temps de calcul qui est rarement exploité. En effet, certaines STD de bâtiments peuvent être très coûteuses en temps de calcul. C'est le cas pour la simulation des modèles PinED et ED avec la version actuelle de la PFM (qui se font en 13 et 10 h respectivement) et dans une moindre mesure avec E+ (25 et 20 min respectivement), comme nous l'avons précisé dans la [partie 3.6.1. i\) du chapitre III](#). Or, le temps de calcul associé à la STD d'un modèle de bâtiment ou de quartier avec E+ est proportionnel à la durée de la séquence simulée, et ce quelle que soit la complexité du cas d'étude modélisé. Cette relation est illustrée par la [figure IV.18](#) pour la pièce de bureau décrite dans la [partie 3.3.3. i\) du chapitre II](#) (image a), pour une maison de la plateforme INCAS à l'INES² (image b) ainsi que pour le modèle PinED du projet « Strasbourg Dense » décrit dans la [partie 3.1 du chapitre III](#) (image c).

La réduction de la période de simulation peut donc permettre de réduire efficacement le temps de calcul associé à la STD du cas d'étude. La longueur du temps d'exécution du processus d'optimisation de projets de densification urbaine étant très largement liée à la durée des STD des bâtiments, cette technique ouvre donc la porte à de fortes diminutions des temps d'optimisation.

1. Page 173, Alain NEVEU dans le livre coordonné par Bruno PEUPORTIER : *Livre blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments*. Les Presses MINES ParisTech, 2013, 238 p.

2. Institut National de l'Energie Solaire.

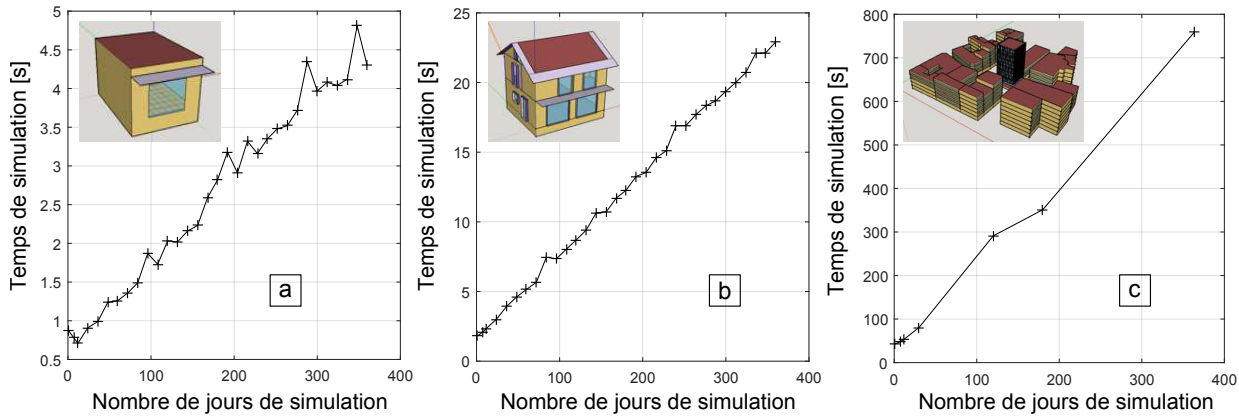


Figure IV.1 – Temps de calcul de la STD avec E+ en fonction du nombre de jours simulés, pour un bâtiment simple (a), une maison INCAS (b) et le modèle PinED du projet « Strasbourg Dense » (c).

2.1 Réduction de la période de simulation

2.1.1 Introduction

La littérature présente un grand nombre de travaux sur les méthodes de construction des fichiers météorologiques annuels à partir d'une ou plusieurs dizaines d'années de données. En revanche, peu de travaux proposent de synthétiser une année de sollicitations en un nombre réduit de journées. Cette technique consiste à déterminer les journées sur lesquelles la simulation du comportement du système donne des résultats cohérents par rapport à ceux obtenus avec une simulation annuelle. Parmi les études d'application de cette méthode, Haller *et al.* [140] proposent de caractériser des systèmes solaires sur la base d'essais semi-virtuels aussi appelés *hardware in the loop* à partir d'une séquence de 12 journées. Une simulation annuelle est nécessaire au préalable afin de sélectionner les journées qui seront générées lors du test. La consommation annuelle du système est calculée en faisant le produit de la consommation mesurée pour chacune des journées par le nombre de jours que cette journée représente.

Dans notre cas, nous nous intéressons à la réduction de la période de simulation de modèles de bâtiments dans une optique d'optimisation de la conception de projets de densification urbaine. La construction de la séquence réduite doit donc se faire à partir de la STD d'un modèle regroupant un bâtiment neuf et son environnement urbain. Cependant, le processus d'optimisation va créer des modèles pour lesquels les caractéristiques du bâtiment neuf seront modifiées. La STD sur la période réduite déterminée en utilisant le modèle initial doit donc permettre d'obtenir un comportement annuel semblable à celui obtenu par STD sur une année entière non seulement pour ce modèle, mais aussi pour les variantes de ce modèle générées par l'algorithme d'optimisation. Il faut donc tester la robustesse de la période réduite vis-à-vis de ces exigences.

Certains travaux ont été réalisés avec une approche similaire à la nôtre. Ainsi, Domínguez-Muñoz *et al.* [141] ont proposé une méthode de sélection automatique de jours types pour résoudre un problème de conception d'une unité de cogénération. Fazlollahi *et al.* [142] ont développé une

méthode de réduction de la période de simulation qu'ils ont appliqué à la résolution d'un problème d'optimisation multiobjectif de conception d'un réseau de production d'énergie (chaleur et électricité) à l'échelle d'un quartier, puis d'un canton. Dans chacun de ces cas, le système étudié est dynamique, c'est à dire que son comportement au pas de temps t dépend de son comportement au pas de temps $t - 1$. La période réduite doit donc prendre en compte cette dynamique pour que le comportement annuel du système simulé sur cette période soit fidèle à celui obtenu en utilisant la séquence complète initiale. La dynamique des systèmes étudiés dans la littérature étant différente de celle des modèles de bâtiments qui nous intéressent, nous avons développé notre propre méthode de réduction de la période de simulation en nous inspirant de ces exemples. Cette méthode ainsi que les premiers résultats de son application à un cas simple sont présentés dans les trois parties suivantes.

2.1.2 Regroupement des journées par groupes : technique du k-means clustering

Soit X un jeu de données obtenu suite à une simulation sur plusieurs jours utilisant le jeu de sollicitations S . Cet ensemble peut être décomposé selon la grandeur observée (notée a), le numéro du jour (noté j) et l'indice de la valeur dans la journée (noté v). On note cette décomposition de la façon suivante : $X = \{x_{v,j,a}\}, (v \in \{1, \dots, V\}, j \in \{1, \dots, J\}), a \in \{1, \dots, A\}$. Pour chaque grandeur a observée on a donc J profils journaliers formés de V valeurs par jour. Nous nous limitons ici à une grandeur observée, qui correspond à la somme des profils de besoins annuels de chauffage (B_{Ch}) et de refroidissement (B_{Froid}) obtenus par STD d'un bâtiment sur 363 jours. On a donc $X = B_{Ch} + B_{Froid}$ et $J = 363$ jours. S correspond au jeu de sollicitations météorologiques sur une année utilisé pour la STD.

2.1.2. i) Description du processus de partitionnement

La première étape consiste à regrouper les 363 journées de la séquence de données météorologiques en un nombre K de groupes. Nous utilisons pour cela un algorithme k-means qui est une méthode de partitionnement de données (*clustering* en anglais). Elle vise à diviser un ensemble de données en différents groupes (des *clusters*) partageant des caractéristiques communes. Le terme de « k-means clustering » a été employé pour la première fois par MacQueen en 1967 [143] suite à une idée proposée par Steinhaus dès 1957 [144]. L'algorithme k-means est un algorithme itératif se déroulant de la façon suivante :

1. tirage aléatoire des K centres,
2. calcul des distances entre chacun des K centres et les 362 autres profils journaliers,
3. affectation de chaque profil journalier au centre le plus proche,
4. actualisation de la position des centres en utilisant les profils qui leur sont rattachés,
5. arrêt du processus si la position des centres n'a pas changé après actualisation, sinon retour à l'étape 2.

À la sortie du processus itératif de partitionnement, on obtient K groupes de profils journaliers avec un centre par groupe. Par la suite nous appellerons les centres des groupes des « journées types ». La métrique utilisée afin de quantifier la distance entre deux journées est la distance euclidienne des profils de besoins énergétiques de la zone thermique ou de l'ensemble des zones thermiques considérées. Une simulation annuelle doit donc être réalisée avant de débiter cette étape. L'utilisation des sorties de la simulation plutôt que ses entrées nous dispense de définir des coefficients de pondération permettant d'agréger les vecteurs météorologiques (température d'air, température de ciel, vitesse et direction de vent, rayonnement solaire...) en une seule grandeur. En effet, ces coefficients pourraient être issus d'une étude de sensibilité du modèle aux composantes du fichier météorologique, comme l'a montré Goffart dans sa thèse [145], mais leur calcul est complexe et nécessiterait un grand nombre d'évaluations du modèle. Outre le gain de temps, réaliser le partitionnement sur les observables du modèle permet de prendre en compte d'autres sollicitations que la météo. Par exemple, les besoins énergétiques prennent en compte l'usage du bâtiment, composé de nombreuses composantes qui peuvent présenter des variations temporelles importantes sur des pas de temps très différents de ceux des variations temporelles des données météorologiques. Il serait donc très complexe d'utiliser comme métrique une grandeur basée sur les entrées du modèle qui agrégerait à la fois les données météorologiques annuelles et les usages du bâtiment.

Nous rappelons que les éléments x appartiennent au jeu de données X qui a été défini comme étant la somme des profils de besoins de chauffage et de refroidissement annuels. La distance euclidienne entre les journées j_1 et j_2 est donc calculée de la façon suivante :

$$d(x_{j_1}, x_{j_2}) = \sqrt{\sum_{v=1}^V (x_{j_1} - x_{j_2})^2} \quad (\text{IV.1})$$

On introduit le booléen $z_{j,k}$ tel que :

$$z_{j,k} = \begin{cases} 1 & \text{si la } j^{\text{ème}} \text{ journée est associée au } k^{\text{ème}} \text{ groupe} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

Chaque journée ne peut appartenir qu'à un seul groupe donc pour chaque journée j , $z_{j,k}$ ne peut valoir 1 que pour un groupe. On a donc : $\sum_{k=1}^K z_{j,v,k} = 1, \forall j, \forall v$. Comme le partitionnement est réalisé jour par jour, on a : $z_{j,k} = z_{j,v,k}, \forall v$. Les heures de début et de fin des journées pourraient donc être modulées à notre convenance. Dans les applications qui suivront, une journée comprend les heures situées dans l'intervalle [1, 24].

Le nombre de journées $Jg(k)$ appartenant au $k^{\text{ème}}$ groupe est calculé de la façon suivante :

$$Jg(k) = \sum_{j=1}^J z_{j,k} \quad (\text{IV.3})$$

La moyenne \bar{x}_j des besoins énergétiques pour une journée j s'écrit simplement :

$$\bar{x}_j = \sum_{v=1}^V x_{j,v} \quad (\text{IV.4})$$

La moyenne journalière \bar{x}_k des besoins énergétiques pour le $k^{\text{ième}}$ groupe est calculée ainsi :

$$\bar{x}_k = \frac{1}{V \times Jg(k)} \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V z_{j,v,k} \times x_{j,v} \quad (\text{IV.5})$$

2.1.2. ii) Illustration du processus de partitionnement

Nous avons appliqué cette technique à l'ensemble des profils de besoins énergétiques journaliers de la pièce de bureau de 20 m² décrite dans la partie 3.3.3. i) du chapitre II obtenus par STD avec E+. Plus précisément, on se base sur les puissances thermiques nécessaires pour respecter les consignes de chauffage et de refroidissement chaque jour de l'année simulée. Par la suite on nomme ces puissances thermiques des « besoins énergétiques » qui sont exprimés en watt. Dans l'exemple que nous utilisons ici, le nombre de groupes à constituer a été fixé à 15. À l'issue de l'opération de partitionnement les 363 profils de besoins journaliers sont donc répartis en 15 groupes. Chaque groupe est associé à sa journée type. La figure IV.2 (a) montre les 363 profils de besoins journaliers de l'année avant le partitionnement. La figure IV.2 (b) montre les 15 journées types sélectionnées par l'algorithme k-means.

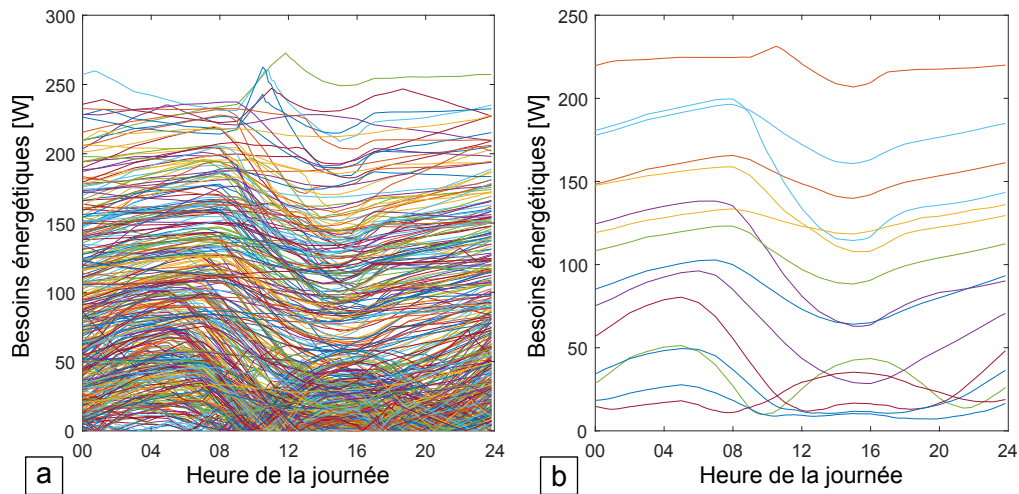


Figure IV.2 – Ensemble des profils de besoins énergétiques journaliers initiaux (a) et journées types obtenues avec l'algorithme k-means paramétré pour constituer 15 groupes (b).

2.1.3 Construction de la séquence réduite

2.1.3. i) Description du processus

Après avoir réparti les jours par groupes à l'aide de l'algorithme k-means, nous allons construire la séquence réduite. Soit Sr l'ensemble réduit des sollicitations météorologiques avec $Sr \subseteq S$. Une

approche très simplifiée consisterait à définir la séquence réduite comme étant la concaténation des séquences météorologiques journalières s_k correspondant aux K centres, c'est à dire :

$$Sr = \{s_1, s_2, \dots, s_K\} \quad (IV.6)$$

On indice par * les grandeurs obtenues en se basant sur la période réduite mais sans avoir effectivement utilisé cette période réduite pour lancer une nouvelle STD du modèle. On considère alors que pour les jours j qui correspondent aux sollicitations journalières s_j retenues dans la séquence réduite Sr , les observables du modèle sont les mêmes avant et après réduction de la période de simulation. Ceci signifie que $\bar{x}_j^* = \bar{x}_j, \forall j$ tel que $s_j \in Sr$. La valeur des besoins énergétiques annuels B initialement obtenue avec S , qui se calcule en posant $B = 24 \times \sum_{j=1}^J \bar{x}_j$, peut alors être recalculée de la façon suivante :

$$B^* = 24 \times \sum_{k=1}^K (\bar{x}_k^* \times Jg(k)) \quad (IV.7)$$

Avec (sachant que $Jg^*(k)$ est le nombre de jours du $k^{\text{ième}}$ groupe dans Sr) :

$$\bar{x}_k^* = \frac{1}{V \times Jg^*(k)} \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^V z_{j,v,k}^* \times x_{j,v} \quad (IV.8)$$

Ceci serait vrai pour un modèle statique. Cependant, les modèles thermiques dynamiques peuvent généralement se mettre sous la forme :

$$\begin{cases} X_{t+1} = M_1 X_t + M_2 S_t \\ Y_t = M_3 X_t + M_4 S_t \end{cases} \quad (IV.9)$$

M_1, M_2, M_3 et M_4 sont des matrices d'état et Y_t un vecteur de sorties. Cette équation met en évidence le fait qu'en plus du vecteur de sollicitation S_t , le vecteur d'état X_t est nécessaire au calcul de X_{t+1} . On peut donc par récurrence en déduire que l'historique des sollicitations météorologiques (à $t-1, t-2, t-3 \dots$) a un impact sur l'évaluation des observables au pas de temps t . Cet impact sera d'autant plus important que les parois ont de l'inertie et que cette masse thermique est mobilisée par des sollicitations intermittentes.

On indice par ** les grandeurs obtenues par STD du modèle en utilisant la séquence réduite Sr au lieu de la séquence initiale S . Si la journée j n'est plus simulée car elle n'existe plus dans la séquence réduite, d'après ce que nous venons d'expliquer on risque d'avoir $\bar{x}_{j+1}^{**} \neq \bar{x}_{j+1}$, ce qui est équivalent à $\bar{x}_{j+1}^{**} \neq \bar{x}_{j+1}^*$. Le but de notre méthode de réduction de la période de simulation est que les besoins énergétiques annuels obtenus par STD sur la séquence initiale et sur la séquence réduite soient aussi proches que possible, tout en ayant retiré un maximum de jours de la séquence initiale

pour gagner un maximum de temps de calcul. L'enjeu de la méthode peut donc être formulé de la façon suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } (Card(Sr)) \\ \text{minimiser } \left(\sum_{j|s_j \in Sr} (\bar{x}_j^{**} - \bar{x}_j^*)^2 \right) \end{array} \right\} \Leftrightarrow \text{minimiser } \left(\sum_{j|s_j \in Sr} (\bar{x}_j^{**} - \bar{x}_j^*)^2 \right) \quad (\text{IV.10})$$

Nous proposons d'approcher la solution par un processus itératif au cours duquel une séquence d'une ou plusieurs journées consécutives pourra être retirée à la séquence courante. Voici les principales étapes de ce processus :

1. initialisation, c'est à dire $i = 0$ et $Sr_0 = S$,
2. évaluation exhaustive des $Nsuppr_i$ suppressions possibles sur Sr_i , en calculant un score pour chacune de ces coupes, avec :

$$Nsuppr_i = (Card(Sr_i) - 1)^2 \quad (\text{IV.11})$$

3. sélection de la coupe permettant d'obtenir un score supérieur au score minimum imposé tout en supprimant le maximum de profils journaliers,
4. si une coupe a bien été sélectionnée lors de l'étape 3 alors application de cette coupe sur Sr_i puis $i = i + 1$ et retour à l'étape 2, sinon arrêt du processus et Sr_i est la séquence réduite finale.

Afin d'éviter $(Card(Sr_i) - 1)^2$ évaluations du modèle pour calculer l'ensemble Xr des observables après réduction de la séquence (qui est nécessaire pour le calcul du score de chaque coupe), Xr est déduit de l'ensemble initial sans aucune simulation, de la façon suivante :

$$Xr = X \setminus Xsuppr \text{ avec } Xsuppr = \{x_{dsuppr}, \dots, x_{dsuppr+lsuppr}\} \quad (\text{IV.12})$$

$Xsuppr$ est l'ensemble des observables supprimés, $dsuppr$ est la date de début de la séquence supprimée et $lsuppr$ est la durée de cette séquence supprimée. Les données météorologiques des journées qui correspondent aux observables supprimés ont évidemment été elles aussi supprimées de façon similaire de la séquence de sollicitations météorologiques S pour obtenir la séquence réduite Sr .

Afin de minimiser $\sum_{j|s_j \in Sr} (\bar{x}_j^{**} - \bar{x}_j^*)^2$, nous introduisons dans l'évaluation du score des indicateurs qui doivent permettre de rejeter les suppressions qui pourraient entraîner des différences importantes entre \bar{x}_j^{**} et \bar{x}_j^* . Nous proposons pour atteindre cet objectif de :

- favoriser le déroulement naturel de la séquence météorologique en évitant le morcellement,
- autoriser une coupe si et seulement si le raccord induit peu de discontinuités,

- imposer la présence de plusieurs représentants de chaque groupe dans la séquence réduite afin d'améliorer sa robustesse,
- favoriser les suppressions qui permettent de conserver des représentants du plus grand nombre de groupes,
- ne pas débiter la séquence en période estivale pour faciliter l'initialisation.

Le calcul du score de chaque coupe s'écrit donc de la façon suivante :

$$Score_{coupe} = I_{DM} \times I_L \times I_R \times I_{DIV} \quad (IV.13)$$

I_{DM} , I_L , I_R et I_{DIV} sont des indicateurs définis ainsi :

I_{DM} , **indicateur de durée minimale des sous-séquences** : afin de limiter le nombre de records et favoriser un déroulement aussi « naturel » et « réaliste » que possible, on introduit cet indicateur qui vaut 1 si chaque sous-séquence Ss composant la séquence réduite Sr contient au moins $J_{sseq_{min}}$ jours. Sinon, la valeur de I_{DM} calculée pénalise le score. Les sous-séquences sont les ensembles délimités par les « espaces vides » laissés lorsque des jours sont supprimés. Soit $J_{sseq}(Ss)$ le nombre de jours de la sous-séquence Ss , on a alors :

$$I_{DM} = \begin{cases} 1 & \text{si } \forall Ss \in Sr, J_{sseq}(Ss) \geq J_{sseq_{min}} \\ \frac{\min(J_{sseq}(Ss), \forall Ss \in Sr)}{J_{sseq_{min}}} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (IV.14)$$

I_L , **indicateur de liaison** : il vaut 1 si les journées situées avant et après la coupe appartiennent au même groupe et 0 sinon.

$$I_L(dsuppr, lsuppr) = \begin{cases} 1 & \text{si } z_{dsuppr-1,k} = z_{dsuppr+lsuppr+1,k} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (IV.15)$$

I_R , **indicateur de représentativité** : cet indicateur vaut 1 si pour l'ensemble des groupes le nombre de jours $Jg^*(k)$ du $k^{\text{ième}}$ groupe dans la séquence réduite Sr est supérieur au seuil Jg_{min} pondéré par les besoins relatifs $\frac{B_k}{B}$ du groupe dans la séquence annuelle, avec $B_k = 24 \times \sum_{j=1}^J (\bar{x}_j \times z_{j,k})$. Dans le cas contraire, l'indicateur vaut 0.

$$I_R = \begin{cases} 1 & \text{si } \forall k \in K, Jg^*(k) > \lceil Jg_{min} \times \frac{B_k}{B} \rceil \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (IV.16)$$

I_{DIV} , **indicateur de diversité** : il est d'autant plus élevé (proche de 1) qu'il y a de groupes présents dans la séquence réduite. Il est calculé de la façon suivante :

$$I_D = \sum_{k=1}^K \left(\frac{Jg^*(k)}{Jg(k)} \times B_k \right) \quad (IV.17)$$

Un indicateur d'initialisation I_{INIT} est utilisé dans le calcul du score seulement pour la première itération. Il vaut 1 si la séquence réduite Sr_1 obtenue à l'issue de cette première itération commence au cours du premier tiers de la séquence initiale S . On a donc :

$$Score_{coupe, \text{ première itération}} = I_{DM} \times I_L \times I_R \times I_{DIV} \times I_{INIT} \quad (IV.18)$$

Avec :

$$I_{INIT} = \begin{cases} 1 & \text{si } (dsuppr_1 + lsuppr_1 - 1) < \frac{J}{3} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (IV.19)$$

2.1.3. ii) Illustration de la construction de la séquence réduite

La [figure IV.3](#) montre l'ensemble des profils journaliers de l'année répartis en 15 groupes (avec une couleur différente par groupe) à l'issue du processus de partitionnement appliqué sur l'exemple introduit plus haut.

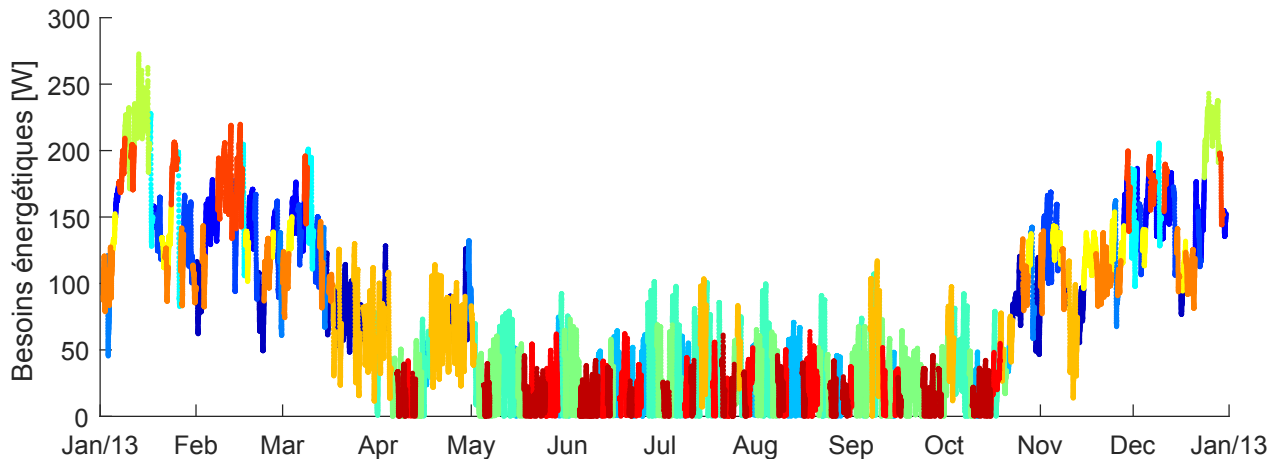


Figure IV.3 – Ensemble des profils de besoins journaliers sur l'année, colorés selon le groupe auquel ils appartiennent à la sortie du processus de partitionnement.

Nous avons choisi $J_{sseq_{min}} = 14$ jours et $J_{g_{min}} = 7$ jours. La [figure IV.4](#) montre les performances de toutes les coupes testées sur ce cas d'étude lors de la première itération (points noirs) ainsi que les coupes ayant le score total le plus élevé pour un nombre de jours retirés donné (croix rouges). Comme expliqué précédemment, la coupe sélectionnée est celle qui permet de retirer le plus grand nombre de jours tout en obtenant un score supérieur au score minimum choisi, qui dans cet exemple a été fixé à 0.9. Lors de cette première itération, la coupe retenue permet de retirer 237 jours en obtenant un score de 1, soit 65 % de la séquence initiale de 363 jours. Après cette coupe, la séquence retenue commence le 10 janvier et se termine le 15 mai. La [figure IV.5](#) présente cette nouvelle séquence.

Le processus se poursuit jusqu'à la cinquième itération, au cours de laquelle aucune des coupes testées ne permet d'atteindre un score de 0.9, comme on peut le voir sur la [figure IV.6](#). La séquence obtenue à l'issue de la quatrième itération est donc le résultat final du processus de construction de

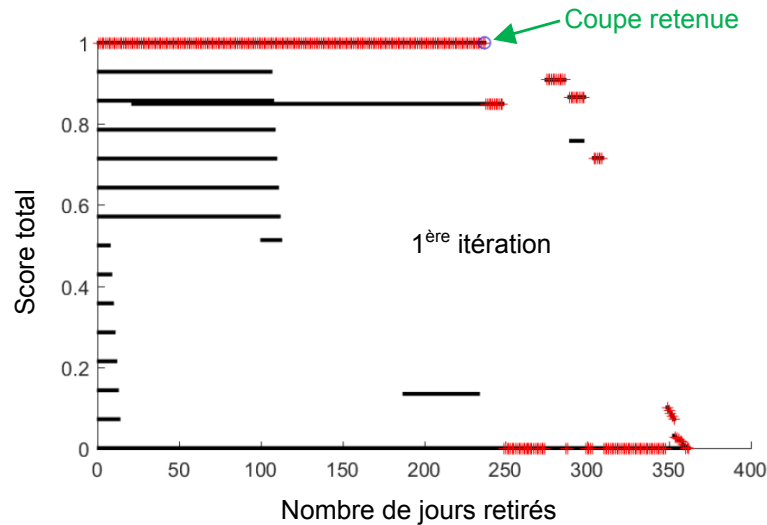


Figure IV.4 – Performances de toutes les coupes testées lors de la première itération.

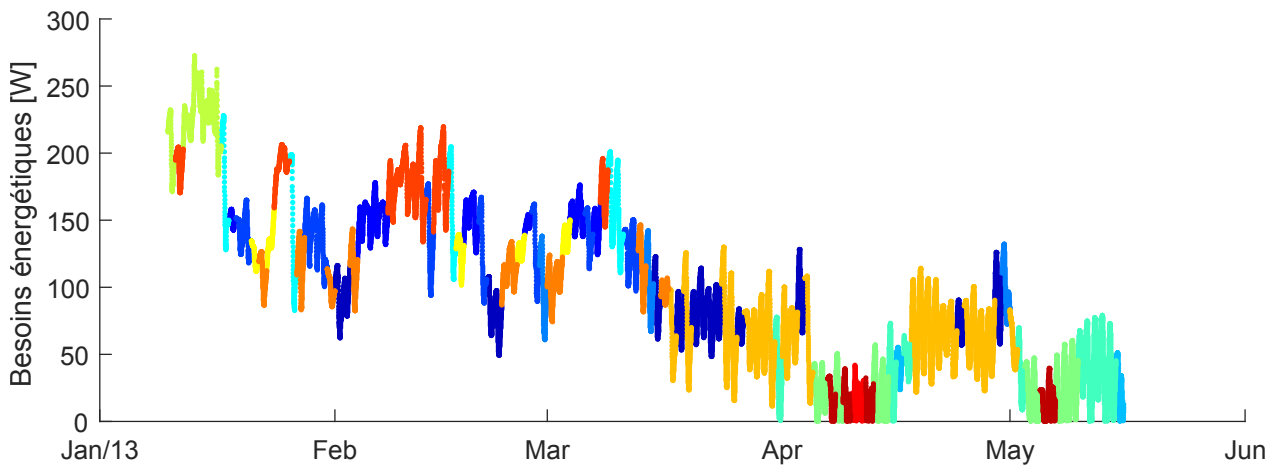


Figure IV.5 – Ensemble des profils journaliers conservés à l'issue de la première itération.

la séquence réduite et est représentée sur la figure IV.7. Cette séquence ne comporte plus que 83 jours ce qui représente une réduction de 77 % par rapport aux 363 jours de la séquence initiale. On a donc économisé 280 jours de simulation.

2.1.4 Evaluation de la qualité de la séquence réduite obtenue

2.1.4. i) Evaluation avant STD sur la séquence réduite

Si le processus de construction de la séquence réduite a été performant, on obtient un échantillon dans lequel toutes les journées types obtenues avec l'algorithme k-means sont représentées au moins une fois. Cependant, certains profils appartenant à certains groupes associés à ces journées types ont été supprimés. Les besoins énergétiques journaliers moyens de chaque groupe obtenus avec la séquence réduite finale ne sont donc pas forcément les mêmes que ceux obtenus avec la séquence initiale. Autrement dit, on n'a pas forcément : $\forall k, \bar{x}_k^* = \bar{x}_k$.

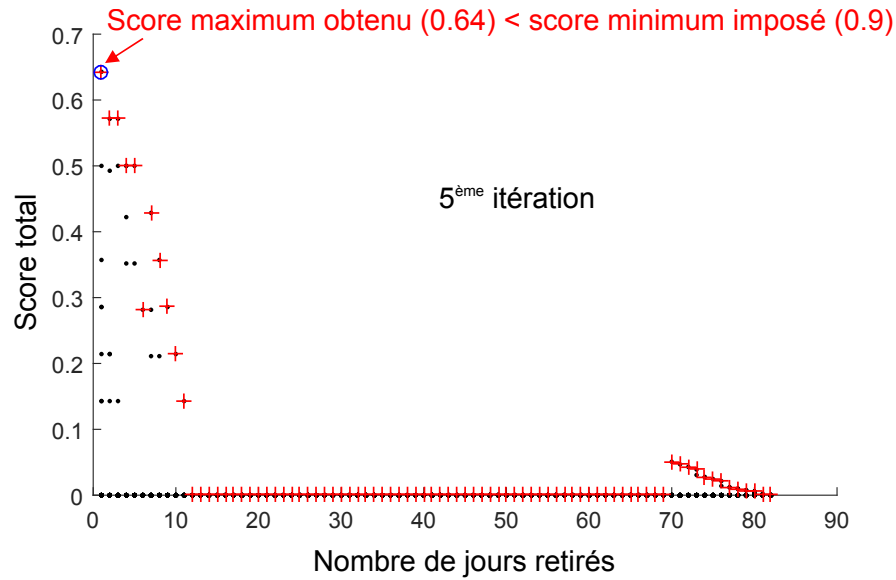


Figure IV.6 – Performances de l'ensemble des coupes testées lors de la cinquième itération.

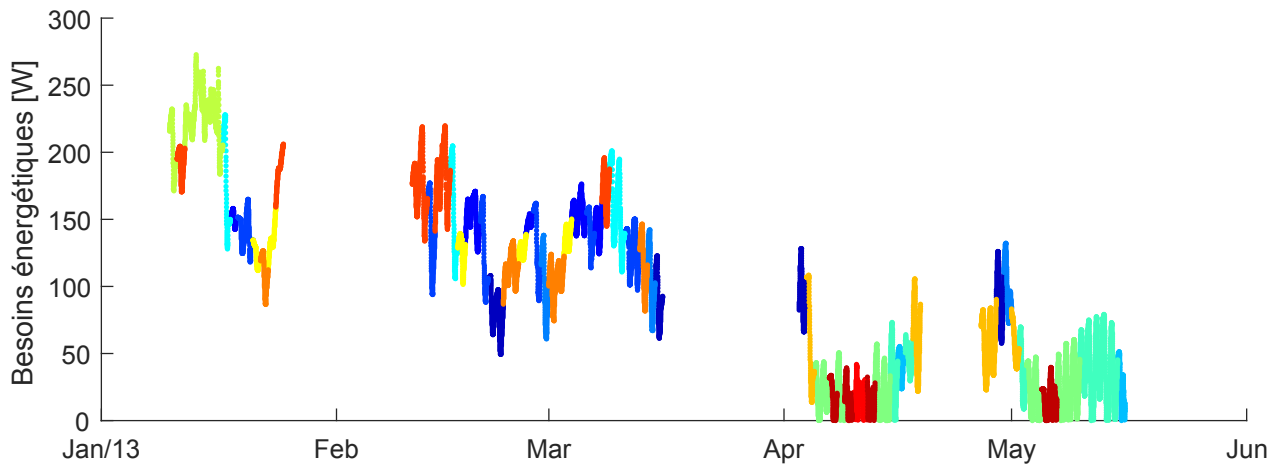


Figure IV.7 – Ensemble des profils journaliers obtenus après la coupe retenue au cours de la quatrième itération.

Afin d'estimer la pertinence de la séquence réduite sans avoir à lancer une simulation, on calcule la valeur des besoins énergétiques annuels à partir de la séquence réduite (B^* , voir l'équation IV.7 dans la partie 2.1.3. i)) puis on calcule leur écart relatif ($\theta_{B^*,B}$) avec les besoins énergétiques annuels obtenus avec la séquence initiale complète (B) :

$$\theta_{B^*,B} = \frac{B^* - B}{B} \quad (\text{IV.20})$$

Ceci permet une évaluation *a priori* de la qualité de la séquence réduite. On se place cependant dans un cas idéal où on suppose que la réduction de la période de simulation n'a pas d'autre influence sur les profils journaliers que de réduire leur nombre. On fait donc l'hypothèse que $\forall j$ tel que $s_j \in S_r, \bar{x}_j^{**} = \bar{x}_j^*$.

2.1.4. ii) *Evaluation après STD sur la séquence réduite*

Les calculs présentés dans la partie ci-dessus sont faits en considérant que la répartition des journées en groupes suite à l'application de la méthode de partitionnement est toujours valable pour la séquence réduite. Or, de nombreux jours ont été supprimés et cela risque de modifier les profils de besoins énergétiques journaliers des jours restants, bien que des indicateurs aient été mis en place afin de minimiser les impacts de ces coupes. En effet, nous avons expliqué précédemment que les besoins énergétiques évalués lors du jour j sont susceptibles d'être impactés par les sollicitations météorologiques du jour $j - 1$.

Nous avons donc appliqué un processus de « réaffectation » à tous les profils de besoins énergétiques journaliers x_j^{**} obtenus par STD sur la séquence réduite. Les journées types (centre de chaque groupe) sont conservées mais on applique à chaque profil x_j^{**} les étapes 2 et 3 du processus de partitionnement (décrit dans la partie 2.1.2. i)) pour vérifier si la journée j appartient toujours au même groupe.

On évalue en fait dans quelle mesure l'hypothèse que $\forall j \text{ tel que } s_j \in Sr, \bar{x}_j^{**} = \bar{x}_j^*$, qui correspond au cas idéal et qui a été prise pour construire la séquence réduite, est pertinente. On considère que poser $\bar{x}_j^{**} = \bar{x}_j^*$ est acceptable si la journée j reste associée au même groupe à la sortie du processus de réaffectation. Si un grand nombre de journées ont été réaffectées à d'autres groupes, cela signifie que la dynamique de la séquence initiale a été modifiée de façon importante et que la qualité de la séquence réduite est mauvaise.

Pour finir, on calcule les besoins énergétiques annuels B^{**} avec la nouvelle répartition des journées parmi les différents groupes :

$$B^{**} = 24 \times \sum_{k=1}^K (\bar{x}_k^{**} \times Jg(k)) \quad (\text{IV.21})$$

Puis on calcule l'écart relatif $\theta_{B^{**},B} = \frac{B^{**}-B}{B}$ entre ces besoins et ceux obtenus avec la séquence complète.

2.1.4. iii) *Illustration de l'évaluation de la qualité de la séquence réduite obtenue*

Pour le cas étudié ici, avant réaffectation les besoins énergétiques annuels B^* obtenus à partir de la séquence réduite valent 32.5 kWh/(m².an) tandis que ceux obtenus avec la séquence complète (B) valent 32.8 kWh/(m².an), d'où un écart relatif $\theta_{B^*,B} = -0.91$ %.

Lors de la réaffectation, 5 journées ont été réaffectées à d'autres groupes, soit 6 % des 83 journées restantes. La réduction de la période de simulation a donc été plutôt performante. Les besoins énergétiques annuels B^{**} obtenus avec la nouvelle séquence réduite issue du processus de réaffectation valent 32.7 kWh/(m².an). Leur écart relatif avec ceux obtenus avec la séquence complète vaut donc $\theta_{B^{**},B} = -0.30$ %.

Nous avons développé cette méthode de réduction de la période de simulation afin de réduire les temps de calculs liés aux STD, ce qui permet de réduire considérablement le temps nécessaire à la réalisation d'une optimisation par algorithme génétique utilisant un logiciel de STD. Il faut donc que la méthode soit performante non seulement pour un individu tel que celui testé ici, mais aussi pour tous les individus qui peuvent être créés au cours du processus d'optimisation.

Nous avons donc testé la robustesse de la méthode sur différents individus obtenus à partir du cas d'étude en faisant varier sur la façade sud : la largeur de la fenêtre (3 possibilités), sa hauteur (3 possibilités), la hauteur de l'allège de la fenêtre (2 possibilités), la longueur de la casquette (2 possibilités) et la hauteur à laquelle elle est située sur la façade (2 possibilités). On obtient 108 configurations différentes, illustrées par la [figure IV.8](#). Plus exactement, cette figure montre 109 configurations car la configuration initiale est représentée par la première image de la première ligne d'images, en haut à gauche. Etant donné que toutes les combinaisons des variables sont testées, la combinaison initiale est aussi simulée à nouveau. On la retrouve ainsi au début de la deuxième ligne d'images.

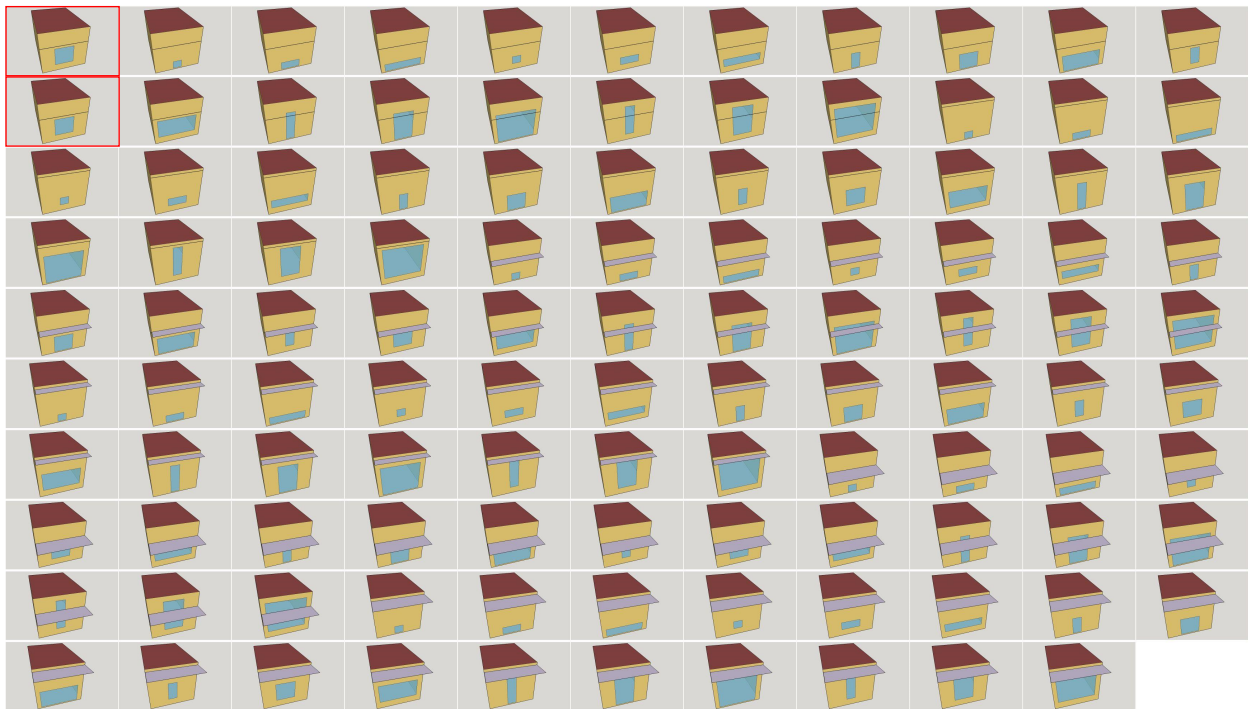


Figure IV.8 – Aperçu des 108 configurations testées, obtenues par variation des tailles et positions du vitrage et de la casquette à partir de la pièce de bureau étudiée

Pour les 108 configurations testées, l'écart relatif $\theta_{B^{**},B}$ obtenu après réaffectation est compris entre - 2 et 7 %. Ces résultats montrent que sur ce cas d'étude la méthode de réduction de la période de simulation est robuste.

2.2 Perspectives de développement

2.2.1 Réduction de la période de simulation d'un projet de densification urbaine en vue de l'optimisation multicritère de sa conception

La méthode de réduction de la période de simulation que nous venons de décrire a montré son efficacité sur un cas d'étude très simplifié, à savoir une pièce de bureau avec une seule zone thermique, sans aucun environnement urbain. Nous avons développé cette méthode pour réduire les temps de calcul nécessaires à la STD de projets de densification urbaine, évaluation qui doit être répétée de très nombreuses fois pour optimiser la conception de tels projets par algorithme génétique. L'étape suivante consisterait donc à appliquer cette méthode de réduction à un projet de densification urbaine comme « Strasbourg Dense ». Comme nous l'avons déjà expliqué, pour être en mesure d'évaluer comment le bâtiment neuf influe sur le bilan énergétique des bâtiments existants il faut étudier le modèle PinED (bâtiment neuf entouré de 22 bâtiments existants modélisés avec 2 zones thermiques par bâtiment). Le contexte est alors différent de celui dans lequel se place l'exemple que nous avons choisi pour illustrer notre méthode : au lieu d'un unique bâtiment (avec une unique zone thermique) on étudie un modèle composé de 23 bâtiments (avec 54 zones thermiques).

Plusieurs questions se posent alors. Tout d'abord, on peut se demander si la méthode de réduction de la période de simulation que nous avons basée sur les besoins énergétiques totaux d'un bâtiment monozone fonctionne aussi si on utilise plutôt les besoins énergétiques totaux d'un bâtiment multizone (par exemple le bâtiment neuf de PinED), voire un ensemble de bâtiments multizones (tous les bâtiments de PinED, ou tous les bâtiments existants...). Ensuite pour utiliser cette méthode dans un contexte d'optimisation multiobjectif il est nécessaire de pouvoir retrouver au moins deux grandeurs qui seront les objectifs de l'optimisation. Il faudrait donc essayer d'appliquer la loi de « mise à l'échelle » (illustrée par l'équation IV.21 de la partie 2.1.4. ii) de ce chapitre pour les besoins énergétiques annuels) propre à la séquence réduite déterminée avec une certaine grandeur à d'autres grandeurs. En effet, on peut utiliser la somme des besoins de refroidissement et de chauffage du bâtiment neuf pour construire la séquence réduite mais être intéressé par les besoins énergétiques d'un bâtiment existant. Si l'utilisation de la même « loi de mise à l'échelle » conduit à une estimation trop erronée du ou des autres objectifs souhaités il sera nécessaire d'introduire le second observable tout au long du processus de construction de la séquence réduite (partitionnement puis élagage itératif du fichier). Ceci reviendrait donc à développer une méthode de réduction de la période de simulation qui soit « multiobjectif ».

Par ailleurs, la méthode de réduction de la période de simulation que nous avons développée comporte certains paramètres d'entrée comme le nombre K de groupes utilisés pour le partitionnement, le nombre minimum de jours à obtenir dans chaque sous-séquence de la séquence réduite ($J_{seq_{min}}$) et le seuil minimum de jours par groupe ($J_{g_{min}}$). Pour illustrer la méthode, nous avons testé plusieurs valeurs de ces paramètres et retenu celles qui permettraient d'obtenir de bons résultats. Afin de mieux appréhender ce paramétrage, il faudrait réaliser des analyses de sensibilité de la qualité de la séquence réduite obtenue aux valeurs de ces paramètres, et ce pour différentes grandeurs utilisées pour construire la séquence réduite.

Enfin, il serait particulièrement intéressant d'appliquer cette méthode de réduction de la période de simulation aux modèles Modelica simulés avec la PFM, car nous avons vu qu'actuellement la STD du modèle PinED sur une année entière prend environ 13 h. Les travaux en cours chez EDF R&D, qui vont être présentés dans [la partie 2.2.2. ii\) de ce chapitre](#) vont permettre de diminuer considérablement ce temps de calcul mais il restera important. L'utilisation de notre méthode de réduction de la période de simulation avec d'autres outils de STD qu'E+ représente un nouveau défi. En effet, cette méthode est applicable si le logiciel de STD utilisé est capable d'utiliser des sollicitations météorologiques présentant des discontinuités temporelles, ce qui n'est pas forcément le cas.

2.2.2 Autres pistes pour la réduction du temps de calcul

2.2.2. i) Lancement de calculs en parallèle

Nous avons expliqué dans [la partie 2.2 du chapitre I](#) que les algorithmes évolutionnaires, famille dont font partie les algorithmes génétiques, manipulent des populations de solutions contrairement à beaucoup de méthodes d'optimisation qui font évoluer une unique solution. Au cours de chaque génération d'un algorithme évolutionnaire, les évaluations de chaque individu sont indépendantes les unes des autres et pourraient donc être effectuées en parallèle, ce qui est un avantage d'un tel algorithme.

Nous nous sommes intéressé récemment aux capacités d'un ordinateur du centre de Grenoble du CEA³. Cet ensemble de machines informatiques pourrait être utilisé de plusieurs manières. La première est la parallélisation de l'optimisation en elle-même, en lançant plusieurs évaluations en parallèle sur des machines différentes à chaque génération. La réduction du temps de calcul serait alors proportionnelle au nombre de STD réalisables simultanément. La deuxième façon d'utiliser ce ordinateur serait de tester de nombreuses optimisations différentes en parallèle. En effet, les exemples d'optimisations qui vont être présentés dans [la partie 3.2 de ce chapitre](#) montrent que plus les possibilités d'optimisations d'un projet de densification urbaine avec différents objectifs et différentes variables sont nombreuses, plus les analyses de la conception du projet sont riches.

Cette démarche de parallélisation du processus d'optimisation et de lancement en parallèle de différentes optimisations gagnerait aussi à être étudiée dans le projet MERUBBI afin d'augmenter la quantité d'analyses réalisables en un temps donné.

2.2.2. ii) Simplification des modèles

Au cours du projet MERUBBI, différentes voies de simplification des modèles simulés ont été proposées. La plupart d'entre elles sont en phase de test ou de développement.

3. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

Une première voie concerne la simplification du modèle Modelica utilisé pour la STD avec Dymola. EDF R&D va ainsi essayer d'implémenter dans la PFM deux techniques qui ont été testées avec succès pour d'autres applications :

- l'agrégation de parois opaques et de surfaces vitrées pour réduire le nombre d'éléments considérés et diminuer ainsi le nombre d'équations à résoudre ;
- la linéarisation du modèle pour obtenir un système matriciel puis la réduction de la taille de la matrice, ce qui permet de gagner beaucoup en temps de calcul en perdant peu en niveau de précision si la technique est bien maîtrisée.

Une deuxième voie est tournée vers la diminution du temps de calcul des échanges radiatifs GLO entre bâtiments, pour laquelle deux méthodes sont en cours de test. La première a été présentée dans [la synthèse du chapitre III](#) et concerne la façon dont les radiosités sont calculées. La seconde repose sur le développement d'un algorithme d'élagage des facteurs de forme qui sont utilisés pour le calcul des échanges radiatifs GLO entre bâtiments, comme nous l'avons expliqué dans [la partie 2.1 du chapitre III](#). Cet algorithme trie tout d'abord les facteurs de forme de chaque surface en fonction de la valeur du produit du facteur de forme par l'aire de la surface concernée et par l'émissivité thermique du revêtement extérieur qui compose cette surface. L'élagage consiste ensuite à ne conserver que les facteurs de forme dont la valeur de ce produit contribue le plus à l'intégrale de ces valeurs sur l'ensemble des facteurs de forme de la scène urbaine. On supprime ainsi les termes qui ont une contribution négligeable au bilan énergétique des bâtiments.

Un troisième levier de simplification des modèles s'appuie sur un module de calcul de « zone d'impact » implémenté par EnerBIM dans l'outil de pré-traitement PT_M. Plus précisément, ce module calcul le capital solaire de chaque bâtiment d'un îlot urbain - c'est à dire le cumul annuel de l'irradiation solaire incidente sur les parois de ces bâtiments - avant et après avoir retiré un des bâtiments de ce quartier. Un tel outil peut donc être utilisé pour estimer l'impact de l'intégration du bâtiment neuf sur le capital solaire des bâtiments existants. On pourrait ainsi restreindre le nombre de bâtiments existants considérés (donc modélisés avec des zones thermiques et simulés) à ceux dont le capital solaire est sensiblement impacté par l'opération de densification, ce qui peut être formalisé par un pourcentage minimum de différence de capital solaire entre avant et après la densification. Ceci permet de se passer de simuler le comportement annuel de bâtiments existants qui seront *a priori* très peu influencés par les paramètres de conception du bâtiment neuf. Cependant il serait tout de même intéressant de modéliser très simplement ces bâtiments (comme de simples masques solaires par exemple) qui peuvent avoir un impact fort sur le bilan énergétique des bâtiments voisins, bâtiment neuf compris (cela peut être le cas avec un bâtiment existant beaucoup plus haut que le bâtiment neuf). Par ailleurs, les premiers tests d'EnerBIM ont été faits en calculant un capital solaire annuel. L'ajout de possibilités d'analyse de l'évolution horaire annuelle de ce capital serait pertinente, car par exemple une faible différence de capital solaire annuel peut cacher de grands écarts de capital solaire reçu pendant la période de chauffage si ces écarts sont très faibles le reste de l'année.

2.2.2. iii) Non évaluation des doublons

Lors de la phase de reproduction d'un algorithme génétique, que nous avons détaillée dans la [partie 2.2 du chapitre I](#), les opérations de croisement et de mutation peuvent venir modifier les individus parents pour donner des individus enfants différents, dont les performances sont alors évaluées. Comme ces deux opérations se produisent selon une certaine probabilité pour chaque paire de parents sélectionnée, parfois les individus enfants sont identiques à leurs parents car il n'y a eu ni croisement ni mutation. Dans ce cas, avec un algorithme génétique comme NSGA-II ces individus enfants ne sont pas évalués.

En revanche, un croisement peut s'effectuer entre deux parents sur un gène pour lequel ils ont le même allèle, dans ce cas les deux individus enfants seront identiques mais l'algorithme génétique va considérer qu'ils sont issus d'un croisement, donc qu'ils doivent être évalués. De la même façon, l'opération de mutation consiste à choisir une valeur au hasard parmi les allèles possibles pour le gène ciblé. Dans un cas comme celui que nous présentons dans [la partie 3 de ce chapitre](#), où les variables (donc les gènes) sont discrètes (elles ont un nombre fini d'allèles) avec un faible nombre de valeurs possibles, la mutation peut aussi produire un individu inchangé que l'algorithme va évaluer car l'individu a subi une mutation. De plus, les opérations de croisement et de mutation peuvent donner naissance à des individus enfants différents des individus parents, mais qui ont déjà été évalués soit au cours d'une génération précédente soit pendant la génération courante. Encore une fois, NSGA-II va tout de même évaluer les performances de ces individus enfants.

Dans le cas d'étude « Strasbourg Dense » exploité dans la partie suivante, une STD de la version 1b du modèle PinED s'effectue en environ 25 min avec E+ donc il nous semble important, pour réduire le temps de calcul global de l'optimisation, de n'évaluer aucun individu enfant qui a déjà été évalué. On appellera ce type d'individu un « doublon ». Nous avons donc modifié notre script pilotant le processus d'optimisation afin qu'avant chaque évaluation d'un individu enfant la liste des individus évalués depuis le début de la première génération soit inspectée. On n'autorise alors l'évaluation à se faire que si le jeu de caractéristiques (valeur de chacune des variables) de l'individu concerné ne correspond à aucun de ceux des individus de cette liste.

Nous proposons ici une amélioration à apporter à notre méthode qui permettrait de gagner encore en temps de calcul. Comme nous allons le voir dans les exemples traités dans [la partie 3 de ce chapitre](#), dans une optique d'aide à la conception d'un projet de densification il peut être intéressant de résoudre successivement plusieurs problèmes d'optimisation du même modèle en changeant les objectifs (et éventuellement les variables) traités. Dans ce cas, certains individus enfants créés au cours d'une optimisation peuvent avoir déjà été évalués lors d'une optimisation précédente. Il serait alors pertinent de faire en sorte que l'évaluation d'un individu enfant ne soit autorisée que si son jeu de caractéristiques ne correspond à aucun de ceux non seulement des individus évalués depuis le début du processus d'optimisation mais aussi des individus évalués au cours de toutes les optimisations précédentes. De la même façon, si plusieurs optimisations sont lancées en parallèle il faudrait que les individus enfants évalués au cours de chaque optimisation

soient tous rassemblés dans la même liste. Avant d'évaluer un de ces individus on consulterait cette liste commune pour vérifier que l'individu en question n'a pas déjà fait l'objet d'une STD.

3 Application de la méthode d'optimisation au projet « Strasbourg Dense » et pistes de développement

Dans cette partie, nous commençons par présenter comment la méthode d'optimisation multicritère utilisant E+, que nous avons décrite dans la partie 3.3.3 du chapitre II, peut être appliquée à un projet de densification urbaine. Pour rappel, cette méthode utilise l'algorithme génétique NSGA-II que nous avons présenté dans la partie 2.5 du chapitre I. Le fonctionnement des algorithmes évolutionnaires, famille dont les algorithmes génétiques font partie, a été détaillé dans la partie 2.2 du chapitre I.

Le cas d'étude auquel nous appliquons cette méthode d'optimisation est la version 1b du modèle PinED du projet « Strasbourg Dense ». Le projet, les quatre modèles et les différentes versions ont été respectivement décrits dans les parties 3.1, 3.2 et 3.3.5 du chapitre III. Le modèle PinED est le modèle complet du bâtiment neuf intégré dans le quartier. Chaque bâtiment existant de cet îlot urbain est modélisé avec une zone thermique non maintenue en température au rez-de-chaussée, et une zone thermique maintenue en température qui rassemble tous les autres étages. La version 1b est celle qui exploite toutes les capacités actuelles de calcul radiatif extérieur du logiciel E+ : une réflexion du rayonnement CLO est prise en compte sur le sol ainsi que sur toutes les surfaces extérieures des géométries modélisées (bâtiments, brise-soleil...).

Nous revenons ensuite sur les possibilités d'optimisations multicritères offertes par la plateforme MERUBBI. Enfin, à la lumière des fonctionnalités existantes chez E+ et de celles en cours d'implémentation dans la PFM, nous proposons des pistes de développement pour aller vers une méthode d'optimisation aussi interactive que possible.

3.1 Présentation des problèmes d'optimisation considérés

3.1.1 Espace des possibles

Nous avons souligné dans la partie 3.3 du chapitre I que la plupart des travaux d'optimisation énergétique à l'échelle du quartier que nous avons repérés jouent principalement sur la morphologie d'un ou plusieurs bâtiment(s). Afin de nous démarquer de cette approche, nous avons préféré nous orienter vers des optimisations dans lesquelles les variables sont des caractéristiques de l'enveloppe d'un bâtiment dont la morphologie est fixée. Au cours de nos échanges avec les partenaires du projet MERUBBI, il est apparu qu'il serait particulièrement complexe d'optimiser la conception d'un bâtiment vis-à-vis de son coût de construction en autorisant des variations des dimensions de son enveloppe. En effet, augmenter fortement la hauteur ou la longueur d'un bâtiment nécessite de modifier ses fondations, ce qui impacte très fortement son coût de construction. Il est néanmoins

dommage de se priver de réflexions sur la morphologie du bâtiment à construire, étant donné que cette dernière peut avoir une influence considérable sur le bilan énergétique des bâtiments existants. Dans le cadre du projet MERUBBI, le CRENAU a enrichi le *plug-in* T4SU pour SketchUp [146] pour lui permettre de calculer l'enveloppe solaire⁴ d'un bâtiment dans un contexte urbain [147]. Cette méthode pourrait être utilisée pour indiquer aux concepteurs de projets de densification urbaine quel est le volume dans lequel un nouveau bâtiment doit être contenu afin de respecter le droit du voisinage à préserver son potentiel d'exposition au soleil.

Ces réflexions nous ont encouragé dans notre démarche. Nous avons donc décidé de permettre à l'algorithme génétique de faire varier les caractéristiques des parois opaques, des vitrages ainsi que des brise-soleil du bâtiment neuf du modèle PinED, sans toucher aux dimensions de ses façades. Plus précisément, la liste des variables des problèmes d'optimisation présentés par la suite inclut :

- le pourcentage de surface vitrée à chaque étage pour chaque façade (τ_{SV}),
- la profondeur des brise-soleil verticaux pour chaque façade ($Prof_{BS}$),
- l'albedo de ces brise-soleil (Γ_{BS}),
- l'albedo du revêtement extérieur des parois verticales (Γ_{Murs}),
- l'épaisseur de la couche d'isolation thermique contenue dans les parois verticales ($ep_{IsolMurs}$),
- le coefficient de déperdition thermique des vitrages (U_w),
- le facteur solaire des vitrages (FS),
- le type de vitrage ($Type_w$) qui permet de faire varier conjointement U_w , FS ainsi que la transmission lumineuse TL ⁵. Etant donné que ces propriétés des vitrages sont liées les unes aux autres, ceci est plus réaliste que d'autoriser leur modification indépendamment les unes des autres.

Toutes ces variables concernent bien le bâtiment neuf uniquement. Dans tous les problèmes d'optimisation évoqués par la suite, aucune modification des bâtiments existants n'est permise, il s'agit toujours de jouer avec les paramètres de conception du bâtiment neuf. Pour chaque façade de ce bâtiment, le pourcentage de surface vitrée et la profondeur des brise-soleil verticaux sont les mêmes à chaque étage mais ils peuvent être différents sur chaque façade. Par conséquent, ces deux variables en représentent en fait huit.

Le [tableau IV.1](#) donne pour chacune de ces variables la liste des valeurs qu'elle peut prendre lorsqu'elle est incluse dans le processus d'optimisation, ainsi que la valeur qu'elle prend lorsqu'elle n'est pas incluse dans ce processus (valeur par défaut, qui correspond aux caractéristiques de l'individu initial).

Le [tableau IV.2](#) décrit les caractéristiques des types de vitrages qui peuvent être choisis lorsque la variable $Type_w$ est sélectionnée pour l'optimisation. Les caractéristiques du double vitrage initial correspondent aux valeurs par défaut des variables U_w et FS données dans le [tableau IV.1](#). La

4. L'enveloppe solaire est un concept défini par Knowles, que nous avons décrit dans [la partie 3.2.1 du chapitre I](#).

5. La transmission lumineuse d'un vitrage est le rapport de la quantité de lumière transmise par le vitrage à la quantité de lumière qu'il reçoit.

Variable	Valeur par défaut	Liste des valeurs possibles si la variable est choisie pour l'optimisation
τ_{SV} [%]	80 au sud, 30 au nord, 60 à l'est et 50 à l'ouest	1, 20, 40, 60, 80 ou 95
$Prof_{BS}$ [m]	0.5	0.25, 0.5, 1 ou 2
Γ_{BS}	0.2	0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ou 0.9
Γ_{Murs}	0.7	0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ou 0.9
$ePIsolMurs$ [m]	0.1	0.01, 0.05, 0.1, 0.15 ou 0.2
U_w [W/(m ² .K)]	1.7	1.1, 1.7, 2.3 ou 2.9
FS	0.55	0.37, 0.52, 0.65, 0.75 ou 0.85
$Type_w$	Double vitrage initial	n°1, n°2, n°3, n°4, n°5, n°6, n°7, n°8 ou n°9

Tableau IV.1 – Valeurs des variables éligibles pour l'optimisation de la conception du bâtiment neuf du modèle PinED.

transmission lumineuse de ce double vitrage initial vaut 0.68. Les vitrages issus du guide de Saint-Gobain Glass sont des doubles vitrages qui permettent le contrôle solaire.

Type	U_w [W/(m ² .K)]	FS	TL	Source
n°1	5.8	0.86	0.9	energieplus-lesite.be/index.php?id=10396#c2234, « simple vitrage »
n°2	2.8	0.76	0.81	<i>idem</i> , « double vitrage clair »
n°3	1.6	0.55	0.70	<i>idem</i> , « double vitrage clair + basse émissivité »
n°4	1.6	0.4	0.70	<i>idem</i> , « double vitrage clair + basse émissivité et réfléchissant »
n°5	1.0	0.34	0.61	Saint-Gobain Glass - Guide de choix des vitrages façades - novembre 2015, « SGG COOL-LITE SKN 165 »
n°6	1.0	0.28	0.52	<i>idem</i> , « SGG COOL-LITE SKN 154 »
n°7	1.1	0.28	0.33	<i>idem</i> , « SGG COOL-LITE SKN 136 »
n°8	1.1	0.23	0.41	<i>idem</i> , « SGG COOL-LITE SKN 144 »
n°9	0.7	0.53	0.62	Bibliothèque de P+C, menuiserie « Passif-Triple vitrage peu émissif argon »

Tableau IV.2 – Description des types de vitrages, qui correspondent aux valeurs que peut prendre la variable $Type_w$ si elle est choisie pour l'optimisation.

3.1.2 Paramétrage de l'algorithme

3.1.2. i) Paramètres quantitatifs

Comme l'explique Recht dans sa thèse [121], les paramètres qui caractérisent les algorithmes évolutionnaires peuvent être répartis en deux types, soit qualitatifs soit quantitatifs. Parmi les paramètres qualitatifs, on trouve par exemple les opérateurs de variation et les stratégies de sélection utilisées par l'algorithme. Dans notre cas nous avons choisi d'utiliser les paramètres qualitatifs de l'algorithme NSGA-II tels qu'ils ont été définis dans l'environnement DEAP, c'est à dire de rester fidèles à la version initiale de cet algorithme qui a fait ses preuves dans de nombreuses applications, comme nous l'avons montré dans le chapitre I.

Les paramètres quantitatifs sont des réglages de l'algorithme par attribution de valeurs numériques. Ils regroupent entre autres la taille de la population, la probabilité de croisement et la probabilité de mutation. Contrairement aux paramètres qualitatifs, on peut modifier des paramètres quantitatifs d'un algorithme évolutionnaire sans le dénaturer. On obtient alors une variante de cet algorithme, tandis qu'une modification d'un paramètre qualitatif aboutirait à un nouvel algorithme.

Recht a exploré en profondeur la problématique du choix des paramètres quantitatifs d'un algorithme évolutionnaire. Il a observé que d'après l'état de l'art en 2016 : « [...] le choix et le réglage d'une métaheuristique sont intrinsèquement liés à la nature du problème, et notamment aux fonctions objectifs considérées, rendant cette question du paramétrage difficile, et sans réponse généralisable. »⁶. Au cours de ses travaux de thèse il a particulièrement étudié l'impact de la taille de la population ainsi que des probabilités de croisement et de mutation sur les performances de NSGA-II. Il en conclut qu'il est nécessaire de « bien appréhender les mécanismes évolutionnaires en jeu lors de l'optimisation, pour pouvoir régler de manière efficace l'algorithme. »⁷ et que pour cela il faut « acquérir une connaissance relativement fine des moteurs de l'exploration opérant dans son algorithme, et cette connaissance passe par l'accumulation d'observations à travers différentes expérimentations. »⁸.

Nos travaux sont concentrés sur le développement d'une méthode d'optimisation de la conception de projets de densification urbaine qui soit générique, c'est à dire applicable à un maximum de situations différentes. Il ne nous a donc pas semblé approprié de nous concentrer sur la recherche du paramétrage optimal de l'algorithme NSGA-II pour un cas d'étude précis. En effet, les valeurs des paramètres quantitatifs qui résulteraient de ce travail conséquent ne seraient probablement pas optimales pour un autre projet de densification d'ilôt urbain, voire pour le même projet avec des fonctions objectifs différentes. Nous avons préféré réserver nos possibilités d'expérimentations à des tests permettant d'illustrer l'intérêt de la méthode, comme ceux que nous allons présenter dans la suite de ce chapitre. Nous avons donc choisi les paramètres quantitatifs listés ci-dessous.

Taille de la population : 20, afin de limiter le temps de calcul total du processus d'optimisation.

Probabilité de croisement : 0.8, ce qui est une valeur élevée mais rencontrée couramment dans la littérature [121].

Probabilité de mutation : 0.15, pour obtenir une grande diversité d'individus (0.15 est une valeur élevée par rapport aux valeurs rencontrées dans la littérature) et ainsi illustrer l'étendue des solutions qu'il est possible d'obtenir avec ce type de méthode.

Par ailleurs, nous avons précisé dans [la partie 2.2 du chapitre I](#) que le processus d'optimisation s'arrête lorsque le critère d'arrêt est atteint. Dans les optimisations que nous présentons dans ce quatrième chapitre, le critère choisi est un nombre de générations maximum, que nous avons fixé à 31 en comptant la génération 0 créée aléatoirement. Etant donné que la STD du modèle PinED

6. Page 175, Thomas Recht : *Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive*. Thèse de doctorat, Énergétique et Procédés. Palaiseau : Université de recherche Paris Sciences et Lettres, 2016.

7. Page 335, *idem*.

8. Page 334, *idem*.

avec E+ se fait en environ 25 min, ceci signifie que le processus d'optimisation peut durer jusqu'à 10 jours et 18 h si tous les individus de la population sont évalués à chaque génération.

Il est cependant possible de mesurer l'évolution de la qualité des solutions au fil des générations et d'arrêter le processus d'optimisation sans attendre la génération 30 si la qualité des solutions stagne. Il existe de nombreux indicateurs pour estimer la performance des algorithmes évolutionnaires en comparant les ensembles de solutions non dominées obtenus à la fin de chaque génération. A l'issue d'une étude comparative de ces indicateurs, Knowles et Corne [148] ont conseillé l'utilisation de quatre d'entre eux, dont l'hypervolume. Ils précisent que ce dernier est adapté à des problèmes avec peu de fonctions objectifs et des ensembles de solutions non dominées qui ne soient pas trop grands. Dans notre cas, nous nous limitons à deux fonctions objectifs afin de pouvoir représenter les solutions sous la forme de fronts de Pareto en deux dimensions. Par ailleurs, nous fixons la taille de la population manipulée par l'algorithme à 20 individus donc l'ensemble de solutions non dominées sera au maximum composé de 20 individus. L'hypervolume est donc un indicateur de la qualité des solutions obtenues qui est pertinent pour les problèmes d'optimisations que nous souhaitons résoudre. De plus, le calcul de cet indicateur pour les solutions produites par NSGA-II est déjà implémenté dans DEAP, ce qui nous facilite la tâche.

3.1.2. ii) Calcul de l'hypervolume des populations

Le calcul de l'hypervolume nécessite de définir un point de référence r . Pour un problème avec deux fonctions objectifs, l'hypervolume d'un ensemble de points non dominés est en fait la surface du polytope orthogonal dont les sommets sont les intersections des projections orthogonales de r avec celles des points de cet ensemble. Sur la figure IV.9 l'hypervolume de la population de trois individus est représenté par la surface grisée. Cette figure est issue des travaux de Fonseca *et al.* [149], sur lesquels les développeurs de l'environnement DEAP se sont basés pour implémenter le calcul de l'hypervolume des populations générées par NSGA-II.

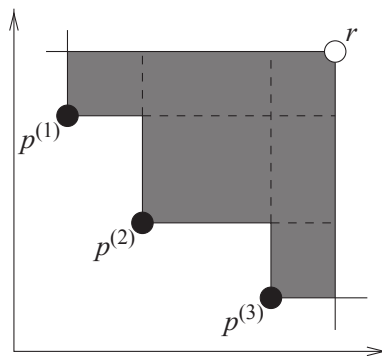


Figure IV.9 – Représentation de l'hypervolume d'un ensemble de trois points non dominés, avec r comme point de référence, pour un problème de minimisation de deux fonctions objectifs, tirée de Fonseca *et al.*, 2006 [149].

L'hypervolume est un indicateur qui permet de rendre compte à la fois de la diversité des solutions obtenues et de leur proximité du front de Pareto optimal. L'évolution de l'hypervolume permet donc de rendre compte à la fois de l'exploration de l'espace de recherche, c'est à dire de la « diversification » des solutions obtenues, et de leur convergence vers le front de Pareto optimal,

que l'on peut aussi appeler « intensification ». Comme on peut le voir sur la [figure IV.10](#), pour un problème de minimisation de deux fonctions objectifs f_1 et f_2 l'hypervolume d'un ensemble de solutions non dominées augmente si cet ensemble se rapproche du Front de Pareto optimal, ou si l'exploration de l'espace de recherche par cet ensemble s'améliore. Dans cet exemple, le point de référence r est fixé.

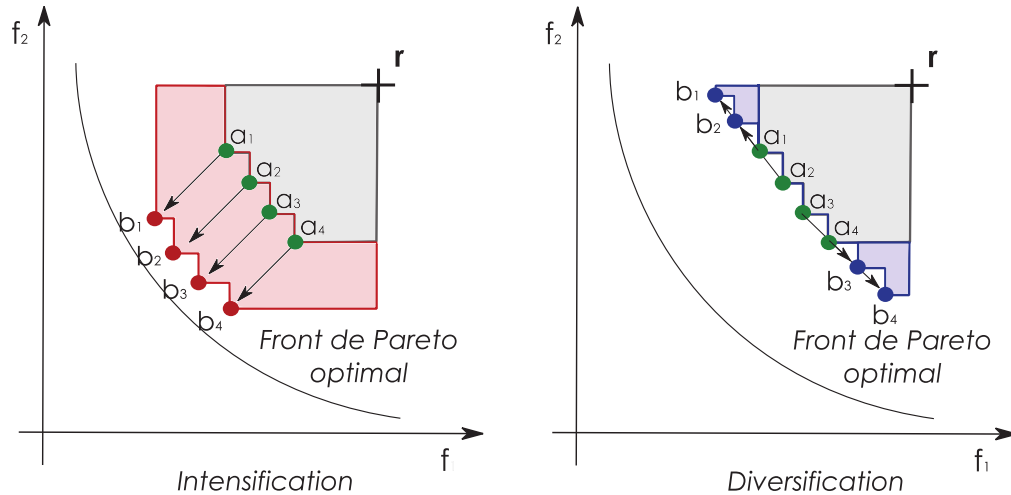


Figure IV.10 – Augmentation de l'hypervolume lors de l'intensification (gauche) ou de la diversification (droite) de l'ensemble de solutions étudié, tirée de Recht, 2016 [121].

Dans DEAP, par défaut le point de référence r change à chaque génération car ses coordonnées sont celles de la moins bonne valeur de chaque objectif à laquelle on ajoute 1. Nous avons conservé cette définition. D'après ce que nous venons d'expliquer, on voit que cette façon de déterminer le point de référence rend le calcul de l'hypervolume plus sensible à la diversification qu'à l'intensification, car la progression vers les frontières de l'espace de recherche (valeurs les moins bonnes de l'un ou l'autre des objectifs) va provoquer une forte augmentation de la surface du polytope.

3.1.2. iii) Calcul du taux de doublons

Nous avons indiqué dans [la partie 2.2.2. iii\) de ce chapitre](#) que nous avons implémenté dans la méthode d'optimisation une instruction pour que les seuls individus évalués à chaque génération soient ceux qui n'ont jamais été évalués depuis le début de la génération 0.

Pour les problèmes traités ici, nous avons fixé la taille μ de la population qui doit être produite à l'issue de chaque génération à 20. De plus, dans l'algorithme NSGA-II que nous utilisons, le nombre λ d'enfants qui doivent être créés lors de la phase de reproduction est $\lambda = \mu$. Le nombre maximum d'individus enfants qui peut être évalué à chaque génération est donc égal à 20. On compte à chaque génération le nombre d'individus qui a été évalué. La différence entre ce nombre et 20 constitue le nombre de doublons qui ont été créés au cours de la génération.

On s'intéresse au rapport entre la somme des doublons créés à chaque génération et le nombre maximum d'individus différents qui auraient pu être créés au cours du processus d'optimisation (égal au produit de la taille de la population par le nombre de générations réalisées). On nomme

ce rapport « taux de doublons ». Cet indicateur est complémentaire de l'hypervolume. En effet, le taux de doublons d'une génération ne caractérise pas la qualité de la population obtenue. Si le taux de doublons d'une optimisation est élevé cela signifie que l'exploration de l'espace de recherche des solutions a favorisé davantage l'intensification que la diversification, et *vice versa*.

La méthode d'optimisation utilisée dans la PFM étant semblable à celle que nous avons présentée, les remarques faites ci-dessous à propos du calcul de l'hypervolume et des doublons sont valables aussi pour cette plateforme.

3.2 Résultats des optimisations réalisées en couplant E+ et NSGA-II

Dans cette partie nous présentons les résultats d'optimisations réalisées avec la méthode que nous avons décrite dans la partie précédente. Pour mentionner certaines variables, nous parlons parfois, par exemple, de l'« épaisseur d'isolant d'un individu » ou du « facteur solaire du vitrage de la façade d'un individu », etc. Ceci est un abus de langage étant donné qu'il faudrait plutôt parler de l'« épaisseur d'isolant dans les façades du bâtiment neuf d'un individu » car chaque individu est ici une variante du modèle PinED du projet « Strasbourg Dense », et dans ce modèle l'algorithme d'optimisation ne modifie que les caractéristiques du bâtiment neuf. Nous nous permettons néanmoins ce raccourci afin de ne pas alourdir le texte.

3.2.1 Minimisation des besoins énergétiques

Les optimisations les plus classiques de la conception de bâtiments visent à minimiser leurs besoins énergétiques annuels. Nous avons donc testé les possibilités offertes par notre méthode dans cette optique. Dans le contexte d'un projet de densification comme celui que nous étudions ici, une attention particulière doit être portée aux impacts de la construction du nouveau bâtiment sur le bilan énergétique des bâtiments existants.

Nous nous intéressons ici à la version 1b du modèle PinED dans laquelle une réflexion solaire est prise en compte sur les surfaces extérieures de la scène urbaine. Les caractéristiques du bâtiment neuf susceptibles d'impacter le bilan énergétique des bâtiments existants sont donc celles liées à la réflexion solaire, comme Γ_{BS} , $Prof_{BS}$, Γ_{Murs} et FS . Étant donné que la réflexion du rayonnement CLO sur les parois opaques n'est pas la même que sur les surfaces vitrées, la variable τ_{SV} est aussi à prendre en compte.

Les paramètres $ep_{IsolMurs}$ et U_w impactent le bilan énergétique du bâtiment neuf, donc ses déperditions thermiques mais ceci n'a pas d'influence sur les bâtiments existants étant donné que les échanges GLO entre les surfaces extérieures des bâtiments ne sont pas pris en compte.

3.2.1. i) Optimisation n°1 : besoins énergétiques du bâtiment neuf, variables $FS / \Gamma_{Murs} / ep_{IsolMurs} / \Gamma_{BS}$

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressé à l'impact des caractéristiques de réflexion solaire des surfaces extérieures du bâtiment neuf, c'est à dire Γ_{BS} , Γ_{Murs} et FS , sur ses propres

besoins énergétiques. La modification de l'albedo du parement extérieur d'un mur risque d'avoir d'autant plus d'impact sur le bilan énergétique du bâtiment que le niveau d'isolation thermique du mur est faible, car l'isolant constitue un frein à la transmission de l'énergie absorbée par le parement extérieur vers l'intérieur du bâtiment. Afin de vérifier ceci, nous avons ajouté $ep_{IsolMurs}$ comme variable du problème d'optimisation. Chacune des 4 variables considérées peut prendre 5 valeurs différentes donc il y a 625 combinaisons possibles.

Le nombre de combinaisons possibles étant à peine plus grand que le nombre d'individus différents que l'algorithme peut générer au maximum (20 x 31 donc 620), il y a de fortes chances qu'on trouve de nombreux doublons au fil des générations. En effet, la [figure IV.11](#) montre qu'au moins neuf doublons ont été créés à chaque génération, sauf pour la génération 0 dont la population est générée aléatoirement.

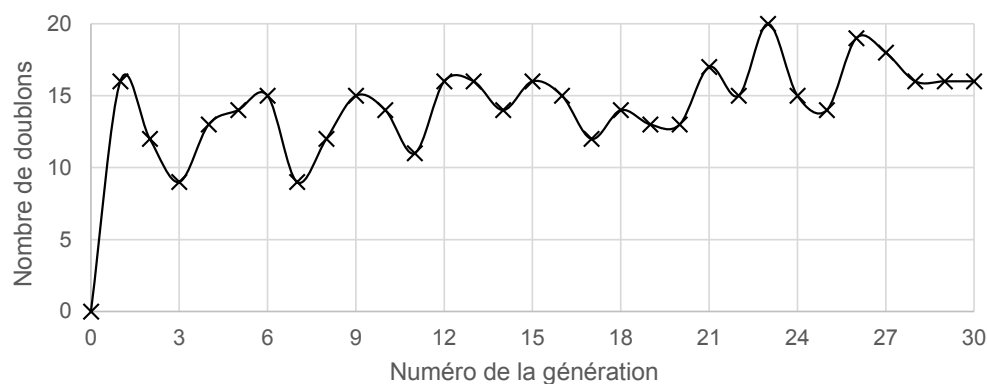


Figure IV.11 – Optimisation n° 1 : nombre de doublons obtenu pour chacune des générations.

Le nombre de doublons total pour cette optimisation est égal à 435, donc le taux de doublons est de 70 %. Seulement 185 individus ont été évalués par STD avec E+, ce qui permet d'obtenir un temps de calcul total de 3 jours et 5 heures au lieu de 10 jours et 18 heures si les 620 individus avaient été évalués.

L'évolution de l'hypervolume de la population obtenu à chaque génération, représentée sur la [figure IV.12](#) montre que la qualité de la population obtenue a brusquement augmenté entre les générations 2 et 3, puis entre les générations 7 et 8.

Ces paliers s'expliquent en observant l'évolution des fronts de Pareto des populations au fil des générations. Par exemple, sur la [figure IV.13](#) on voit qu'entre le front de Pareto obtenu lors de la génération 2 et celui obtenu à la génération 3 il y a bien eu à la fois une intensification et une diversification de l'ensemble des solutions considérées. Le front de Pareto obtenu à l'issue de cette première optimisation, donc pour la génération 30, est lui représenté sur la [figure IV.14](#).

Nous avons indiqué sur ce graphique la position de l'individu initial, c'est à dire la version 1b du modèle PinED pour laquelle nous rappelons les besoins énergétiques obtenus pour le bâtiment neuf : 27.6 kWh/(m².an) pour le chauffage et 22.9 kWh/(m².an) pour le refroidissement soit un total de 50.5 kWh/(m².an). Nous avons aussi repéré sur cette figure l'individu qui, parmi ceux du front de Pareto obtenu à la génération 30, a les besoins énergétiques annuels totaux les plus faibles.

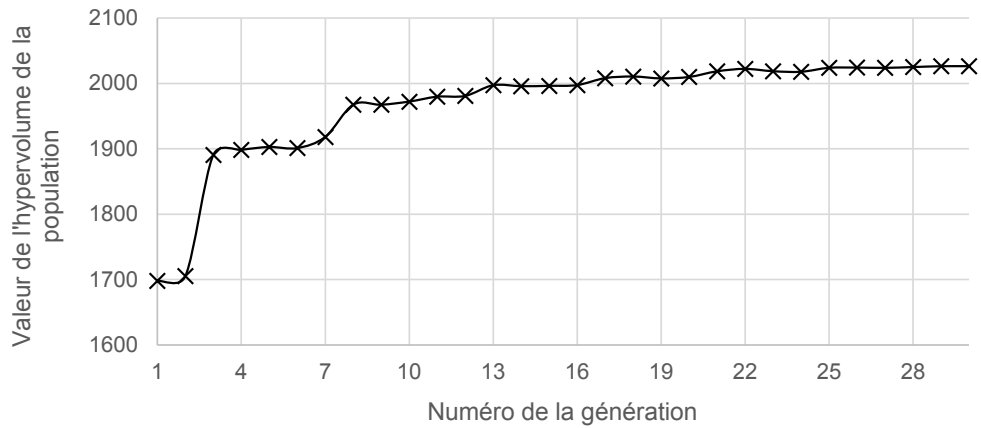


Figure IV.12 – Optimisation n° 1 : valeur de l'hypervolume de la population obtenue pour chacune des générations.

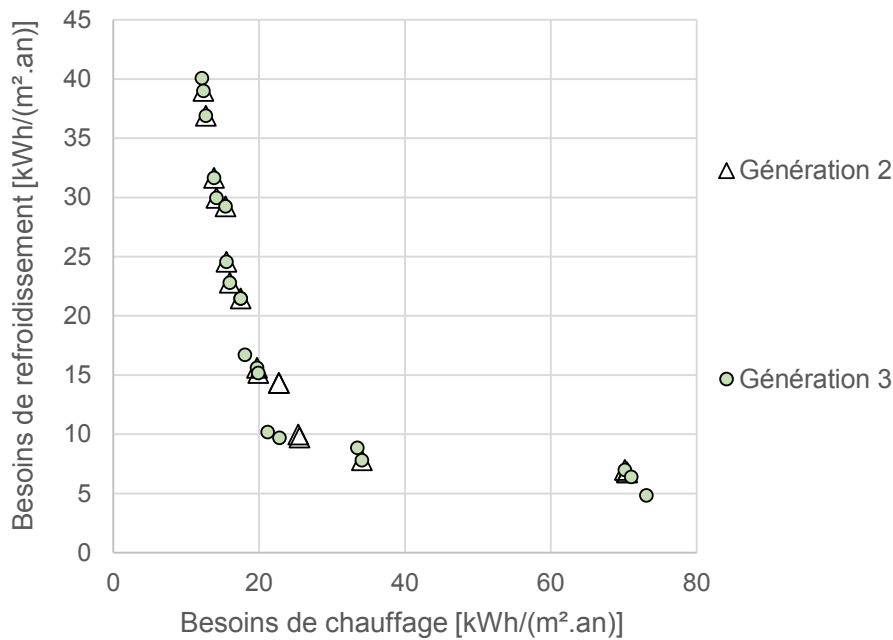


Figure IV.13 – Optimisation n° 1 : fronts de Pareto obtenus pour les populations des générations 2 et 3.

Les valeurs de ces besoins sont 31.9 kWh/(m².an) dont 20.7 kWh/(m².an) pour le chauffage et 11.2 kWh/(m².an) pour le refroidissement. L'optimisation réalisée permet donc de diminuer les besoins énergétiques totaux du modèle de 37 %. Les valeurs des variables obtenues pour cet individu sont $FS = 0.37$, $\Gamma_{Murs} = 0.1$, $ep_{IsolMurs} = 0.2$ m et $\Gamma_{BS} = 0.9$. Celles de l'individu initial sont $FS = 0.55$, $\Gamma_{Murs} = 0.7$, $ep_{IsolMurs} = 0.1$ m et $\Gamma_{BS} = 0.2$.

Si on se focalise sur les besoins de chauffage, l'individu n°1 a les plus faibles avec 12.1 kWh/(m².an), soit une diminution de 56 % par rapport à l'individu initial. Au niveau des besoins de refroidissement, l'individu n°18 a les plus faibles avec 3.7 kWh/(m².an), soit une diminution de 84 % par rapport à l'individu initial. Les caractéristiques de ces individus figurent dans le [tableau IV.3](#), lignes 6 et 7. Sans surprise, les parois opaques du bâtiment neuf ont une épaisseur d'isolant de 0.2 m chez l'individu n°1. Cette épaisseur n'est que de 0.01 m chez l'individu n°18 donc l'algorithme d'opti-

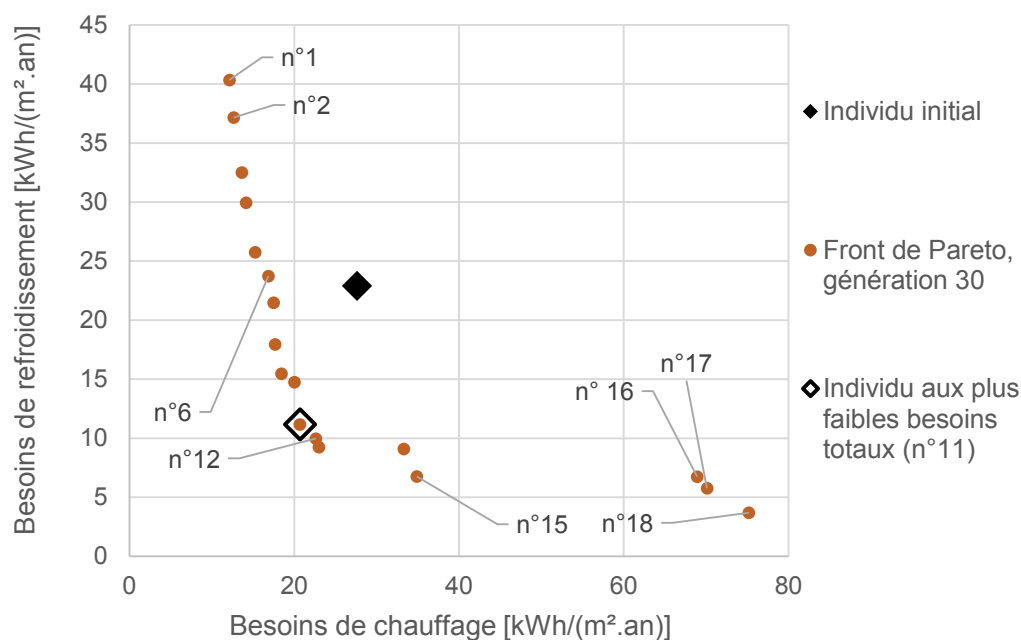


Figure IV.14 – Optimisation n°1 : front de Pareto obtenu pour la population de la génération 30 et individu initial, avant optimisation.

l'optimisation minimise l'isolation des parois pour minimiser les besoins de refroidissement, ce qui ne va pas de soi.

Par ailleurs, un large espace n'est couvert par aucun individu entre le n°15 et le n°16, ce qui est lié à un grand écart de besoins de chauffage. Ceci vient de la variable $ep_{IsolMurs}$, qui vaut 0.05 m pour l'individu n°15 et 0.01 m pour les individus n°16, 17 et 18. Les valeurs des variables des individus n°15 et n°18 sont les mêmes, sauf pour $ep_{IsolMurs}$. Les cinquième et sixième lignes du tableau IV.3 montrent ces caractéristiques ainsi que les besoins énergétiques obtenus. On voit clairement que les premiers centimètres d'isolant ont un impact énorme sur les besoins de chauffage : le passage de 0.05 à 0.01 m les fait augmenter de 116 %.

N°	FS	Γ_{Murs}	$ep_{IsolMurs}$ [m]	Γ_{BS}	Besoins de chauffage [kWh/(m ² .an)]	Besoins de refroidissement [kWh/(m ² .an)]
6	0.65	0.9	0.15	0.9	16.9	23.7
12	0.37	0.9	0.15	0.9	22.6	10.0
16	0.52	0.7	0.01	0.1	68.9	6.7
17	0.52	0.9	0.01	0.1	70.1	5.8
15	0.37	0.9	0.05	0.1	34.9	6.8
18	0.37	0.9	0.01	0.1	75.2	3.7
1	0.85	0.1	0.2	0.9	12.1	40.3
2	0.85	0.1	0.2	0.3	12.6	37.2

Tableau IV.3 – Optimisation n°1 : valeurs des variables des paires d'individus du front de Pareto final ayant les mêmes valeurs pour toutes les variables sauf une.

Les résultats de l'optimisation peuvent être utilisés de la même façon pour rendre compte de l'impact de la modification de chacune des autres variables du problème sur les objectifs, comme nous

le montrons dans le [tableau IV.3](#). On observe par exemple que la diminution du facteur solaire FS des vitrages (donc de la quantité de rayonnement solaire qui entre dans les pièces concernées), ainsi que celle de l'albedo Γ_{BS} des brise-soleil, impactent plus fortement les besoins de refroidissement du bâtiment neuf que ses besoins de chauffage. Dans le cas des individus n°16 et 17, seule la valeur de l'albedo des parois verticales opaques (Γ_{Murs}) change. En la passant de 0.7 à 0.9, les besoins de chauffage augmentent légèrement et ceux de climatisation diminuent car les parois absorbent moins d'énergie solaire, donc elles en restituent moins à la pièce concernée. L'influence de Γ_{Murs} sur les besoins énergétiques est liée au niveau d'isolation des parois opaques car plus elles sont isolées, plus la part de l'énergie absorbée par le revêtement de surface extérieure de la paroi qui est transmise à l'intérieur est faible. Le [tableau IV.4](#) rassemble les caractéristiques de deux paires d'individus pour lesquels seul Γ_{Murs} est modifié : les individus n°16 et 17 du front de Pareto de la génération 30 vus précédemment, et les individus n°1 et 2 du front de Pareto de la génération 26. On voit ici qu'augmenter l'albedo du revêtement extérieur des parois opaques de 0.2 a plus d'impact sur les besoins énergétiques du bâtiment si ces parois ne sont quasiment pas isolées (individus n°16 et 17) que si elles sont bien isolées (individus n°1 et 2).

N°	FS	Γ_{Murs}	$ePIsolMurs$ [m]	Γ_{BS}	Besoins de chauffage [kWh/(m ² .an)]	Besoins de refroidissement [kWh/(m ² .an)]
16	0.52	0.7	0.01	0.1	68.9	6.7
17	0.52	0.9	0.01	0.1	70.1	5.8
1	0.85	0.1	0.2	0.9	12.1	40.3
2	0.85	0.3	0.2	0.9	12.2	40.1

Tableau IV.4 – Optimisation n° 1 : comparaison des caractéristiques de deux paires d'individus, une du front de Pareto final (n° 16 et 17) et une du front de Pareto de la génération 26 (n° 1 et 2).

3.2.1. ii) Optimisation n°2 : besoins énergétiques du bâtiment 15, variables $FS / \Gamma_{Murs} / \Gamma_{BS}$

Nous venons d'analyser les résultats de la minimisation des besoins énergétiques du bâtiment en optimisant le niveau d'isolation de ses parois opaques ainsi que les caractéristiques réfléchives de ses éléments de façade. Suite à une telle étude, il paraît cohérent qu'une équipe de conception s'intéresse à l'impact de ces mêmes propriétés réfléchives sur les besoins énergétiques des bâtiments voisins du bâtiment à construire. Dans [la partie 3.4.1. i\) du chapitre III](#), nous avons vu que le bâtiment 15 est le bâtiment existant le plus impacté par l'opération de densification, de par sa configuration et sa position par rapport au nouveau bâtiment. Pour les optimisations prenant en compte le bâti existant nous avons donc choisi de nous concentrer sur ce bâtiment, plutôt que de considérer l'ensemble des bâtiments existants dont certains ne sont pas impactés par la densification du quartier. Sur [la figure IV.15](#), qui montre la position du bâtiment 15 dans le quartier, on peut voir que sa façade est fait face au bâtiment neuf.

Les objectifs de cette deuxième optimisation sont la minimisation des besoins de chauffage et de climatisation du bâtiment 15. Les variables considérées sont FS , Γ_{Murs} et Γ_{BS} . L'isolation des parois opaques est fixée à sa valeur par défaut car sa modification n'aurait pas d'impact sur les besoins

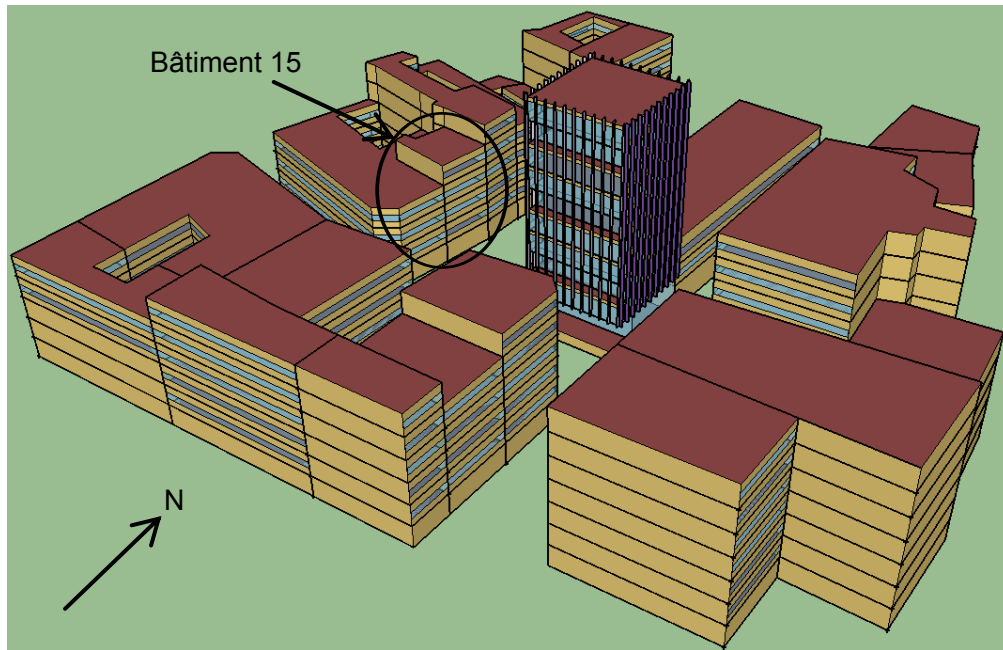


Figure IV.15 – Position du bâtiment 15 dans le quartier et par rapport au bâtiment neuf, dans le modèle PinED réalisé avec le plug-in d'OpenStudio pour SketchUp.

énergétiques du bâtiment 15 comme nous l'avons expliqué précédemment. Le problème n'ayant plus que 3 variables pouvant prendre 5 valeurs chacune, il n'y a plus que 125 combinaisons possibles. On retrouve donc un fort taux de doublons (81 %) et sur les 31 générations seuls 100 individus sont évalués, pour un temps de calcul total de 1 jour et 18 heures. L'hypervolume des populations stagne à partir de la cinquième génération. Le front de Pareto obtenu à l'issue de cette seconde optimisation est représenté sur la [figure IV.16](#).

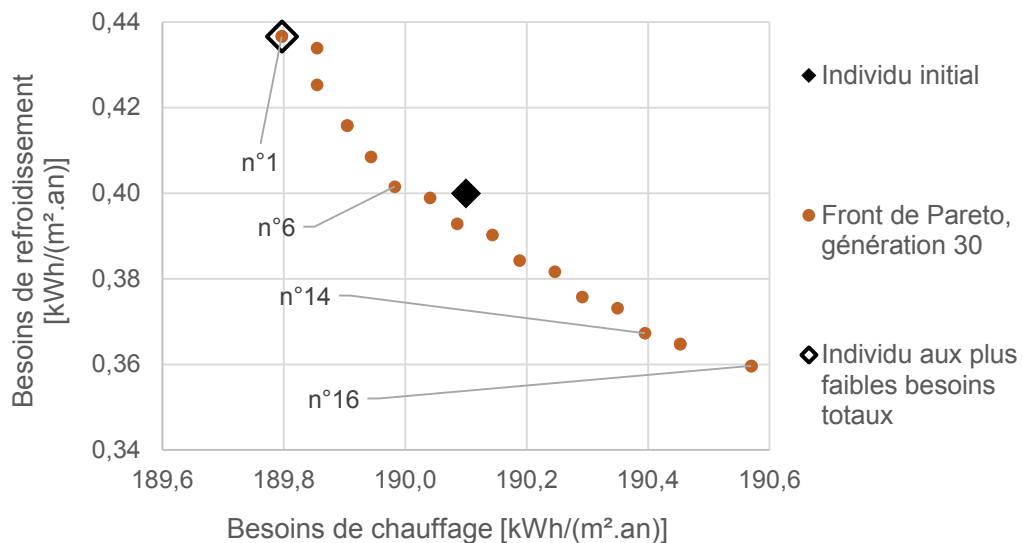


Figure IV.16 – Optimisation n°2 : front de Pareto obtenu pour la population de la génération 30 et individu initial, avant optimisation.

Nous avons à nouveau indiqué sur ce graphique la position de l'individu initial, mais ce sont cette fois les besoins énergétiques du bâtiment 15 qui nous intéressent. Les valeurs obtenues avec E+

pour la version 1b de PinED sont 190.10 kWh/(m².an) pour le chauffage et 0.40 kWh/(m².an) pour le refroidissement soit un total de 190.50 kWh/(m².an). Comme précédemment, l'individu ayant les besoins énergétiques annuels totaux les plus faibles a été repéré sur le graphique. Ses besoins de chauffage valent 189.80 kWh/(m².an) et ceux de refroidissement 0.44 kWh/(m².an) soit un total de 190.24 kWh/(m².an). Cet individu est aussi celui qui a les besoins de chauffage les plus faibles. Le gain sur les besoins énergétiques du bâtiment 15 permis par cette optimisation est donc très faible.

Pour cette deuxième optimisation, le [tableau IV.5](#) montre l'impact de la modification de chacune des variables du problème sur les besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment 15.

N°	FS	Γ_{Murs}	Γ_{BS}	Besoins de chauffage [kWh/(m ² .an)]	Besoins de refroidissement [kWh/(m ² .an)]
1	0.37	0.9	0.7	189.80	0.44
6	0.85	0.9	0.7	189.98	0.40
14	0.85	0.1	0.7	190.39	0.37
16	0.85	0.1	0.1	190.57	0.36

Tableau IV.5 – Optimisation n°2 : caractéristiques des paires d'individus du front de Pareto final ayant les mêmes valeurs pour toutes les variables sauf une.

L'individu n°6 est utilisé à la fois pour la comparaison avec l'individu n°1 et l'individu n°14. Ce dernier est aussi utilisé pour la comparaison avec l'individu n°16. On constate que le facteur solaire des vitrages, les albédos du revêtement extérieur des parois opaques ainsi que celui des brise-soleil ont beaucoup moins d'impact sur les besoins énergétiques du bâtiment 15 que sur ceux du bâtiment neuf.

3.2.1. iii) Optimisation n°3 : besoins énergétiques du bâtiment 15, variables $FS / \Gamma_{Murs} / \Gamma_{BS} / \tau_{SV} / Prof_{BS}$

Pour cette troisième optimisation, nous avons ajouté les pourcentages de surface vitrée et la profondeur des brise-soleil sur chaque façade parmi les variables prises en compte. Ces variables peuvent avoir un impact sur les besoins énergétiques du bâtiment 15, en particulier pour la façade ouest du bâtiment neuf qui fait face à ce bâtiment existant. Sur chacune des 4 façades, le pourcentage de surface vitrée peut prendre 5 valeurs différentes et la profondeur des brise-soleil peut en prendre 4, donc le nombre de combinaisons possibles est énorme (41 472 000). L'hypervolume se stabilise autour de la treizième génération donc nous avons arrêté le processus à la génération 16. Sur les 17 générations (donc au maximum 340 individus différents), on obtient un taux de doublons de 31 % car 233 individus ont été évalués en 4 jours et 1 heure. La [figure IV.17](#) montre le front de Pareto obtenu pour la population de la génération 16.

Les besoins énergétiques annuels totaux les plus faibles obtenus valent 189.99 kWh/(m².an) avec une part de 189.56 kWh/(m².an) pour le chauffage et 0.44 kWh/(m².an) pour le refroidissement. Ces résultats sont très proches de ceux obtenus pour l'optimisation n°2. Ici, toutes les variables pouvant avoir un impact sur le bilan énergétique du bâtiment 15 sont prises en compte mais le gain

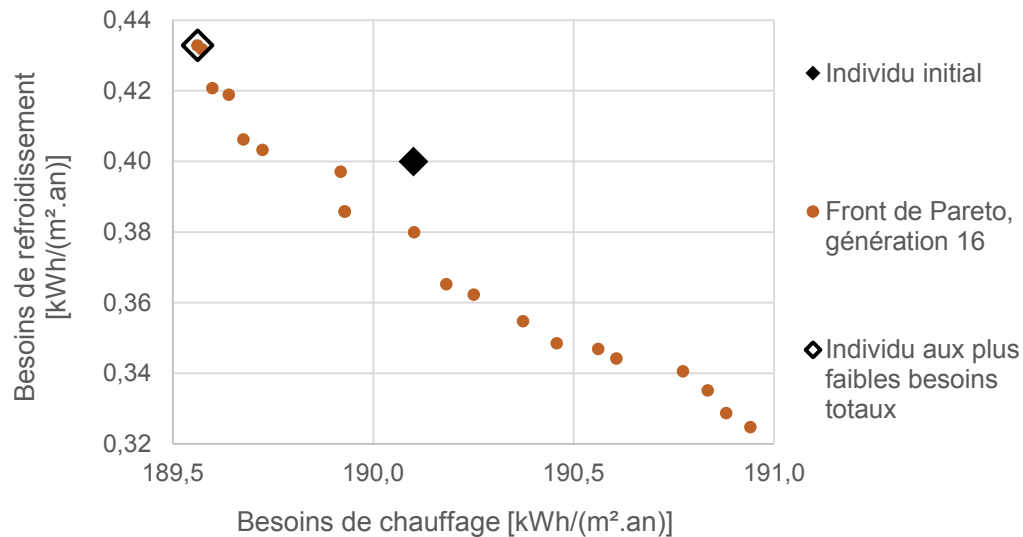


Figure IV.17 – Optimisation n°3 : front de Pareto obtenu pour la population de la génération 16 et individu initial.

apporté par l'optimisation reste faible. Il semble qu'à morphologie fixée, les modalités de conception du bâtiment neuf ont un impact très limité sur les besoins énergétiques du bâtiment 15.

Plusieurs pistes peuvent être avancées pour expliquer ceci. Tout d'abord, bien que le bâtiment 15 soit l'un des plus proches du bâtiment neuf parmi les bâtiments existants, 17 m séparent tout de même les deux édifices. De plus, les paramètres de conception du bâtiment neuf sur lesquels nous avons joué impactent la quantité de rayonnement solaire qui atteint la façade est du bâtiment 15. Seuls 30 % de cette façade sont vitrés. Dans le cas d'une façade très fortement vitrée, on peut supposer que le bilan énergétique du bâtiment serait plus sensible aux variations d'apports solaires. Enfin, les variables que nous avons considéré devraient aussi avoir un impact sur la quantité de lumière naturelle reçue par le bâtiment 15. Dans E+, il est possible de prendre en compte l'éclairage naturel pour diminuer l'énergie apportée pour l'éclairage artificiel, qui a un impact sur les besoins énergétiques du bâtiment car les dispositifs d'éclairage artificiel dégagent de la chaleur. Cette fonctionnalité n'a pas été utilisée jusqu'ici. Nous verrons par la suite comment son activation peut impacter les résultats des optimisations.

3.2.1. iv) Optimisation n°4 : besoins énergétiques du bâtiment neuf, variables $FS / \Gamma_{Murs} / \Gamma_{BS} / \tau_{SV} / Prof_{BS} / ep_{IsolMurs} / U_w$

Nous venons de présenter dans quelle mesure la conception du bâtiment neuf peut influencer sur le bilan énergétique d'un des bâtiments existants. Nous proposons ici de revenir sur les possibilités de minimisation des besoins énergétiques du nouveau bâtiment. L'optimisation n°1 allait dans ce sens, mais les seules variables prises en compte étaient le facteur solaire des vitrages (FS), l'albedo des brise-soleil (Γ_{BS}) ainsi que le niveau d'isolation des parois opaques ($ep_{IsolMurs}$) et l'albedo de leur revêtement extérieur (Γ_{Murs}). Nous ajoutons ici le pourcentage de surface vitrée (τ_{SV}) et la profondeur des brise-soleil ($Prof_{BS}$) pour chaque façade ainsi que le coefficient de déperdition thermique des vitrages (U_w). Avec autant de variables, le nombre de combinaisons possibles explose (829 440

000) et l'optimisation par algorithme génétique prend tout son sens, car elle permet d'approcher les solutions optimales avec un nombre réduit d'évaluations.

En 31 générations, 441 individus sont évalués donc le taux de doublons vaut 29 %. Le temps de calcul total est de 7 jours et 14 heures. L'hypervolume de la population évolue peu à partir de la génération 18, comme on peut le voir sur la [figure IV.18](#). A quelques générations près ceci était prévisible car lors de l'optimisation n°1, pour laquelle les objectifs étaient les mêmes qu'ici, l'hypervolume évoluait peu à partir de la génération 13. Nous avons cependant laissé le processus se dérouler jusqu'à la génération 30, afin de comparer ce qu'ont apporté ces 12 générations supplémentaires, qui représentent 3 jours et 2h de simulation car à la fin de la génération 18, 258 individus avaient été simulés pour un temps de calcul de 4 jours et 12 heures. La [figure IV.19](#) présente les fronts de Pareto obtenus à partir des populations des générations 18 et 30.

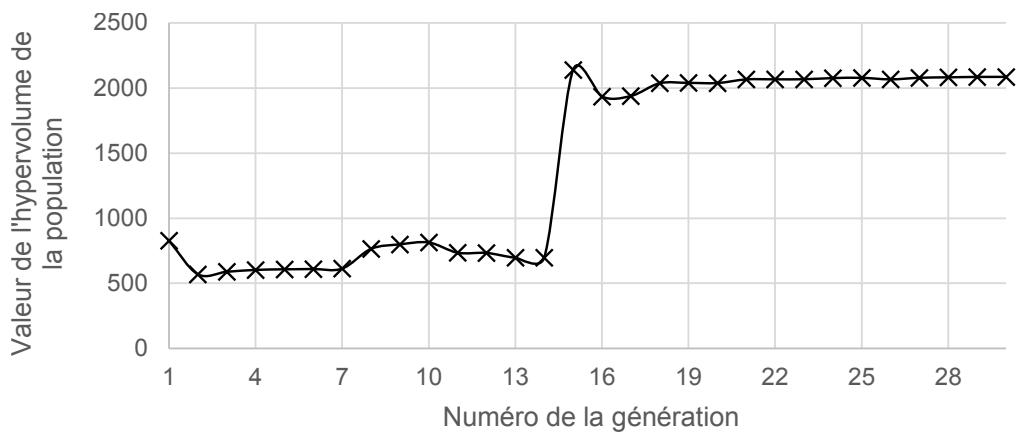


Figure IV.18 – Optimisation n°4 : valeur de l'hypervolume de la population obtenue pour chacune des générations.

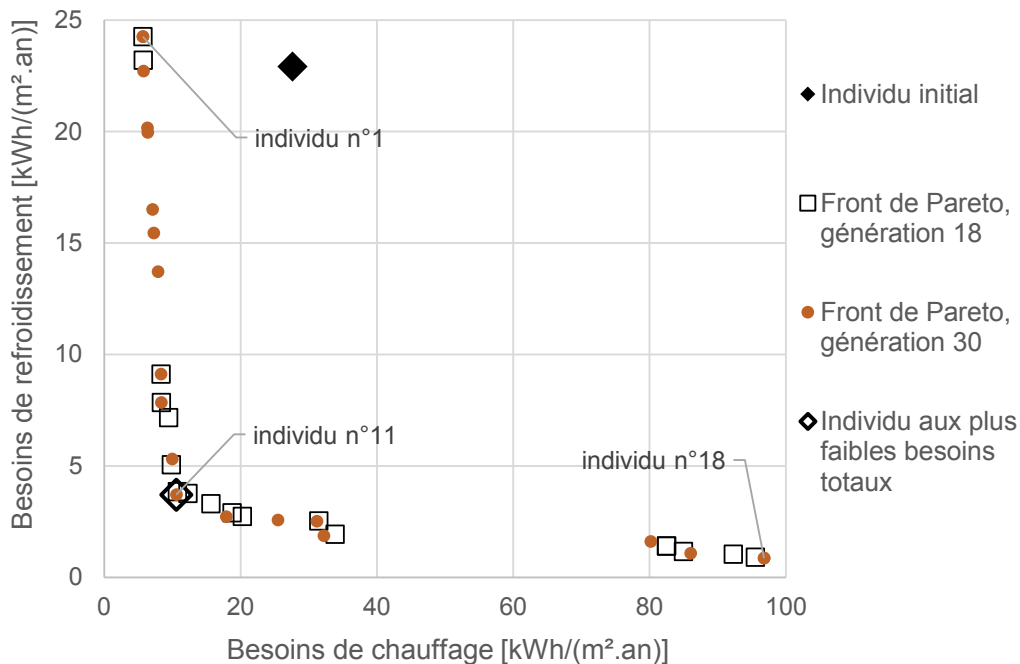


Figure IV.19 – Optimisation n°4 : individu initial, avant optimisation et fronts de Pareto obtenus pour la population des générations 18 et 30.

On constate que la principale différence entre ces deux ensembles de solutions est la meilleure exploration de l'espace de recherche par le front de Pareto de la génération 30. En revanche, les individus ayant les plus faibles besoins de chauffage, de refroidissement ou totaux pour les deux fronts sont très proches. Si l'utilisateur de la méthode était uniquement intéressé par ces résultats, s'arrêter à la génération 18 aurait été suffisant. Les individus ayant les besoins de chauffage, de refroidissement et totaux les plus faibles parmi les solutions qui composent le front de Pareto de la génération 30 sont aussi repérés sur cette figure. Il s'agit respectivement des individus n°1, 18 et 11. Le [tableau IV.6](#) donne les valeurs de ces trois besoins pour chacun de ces individus.

Individu	Besoins de chauffage [kWh/(m ² .an)]	Besoins de refroidissement [kWh/(m ² .an)]	Besoins totaux [kWh/(m ² .an)]
initial	27.6	22.9	50.5
n°1	5.7	24.3	29.9
n°18	96.8	0.9	27.7
n°11	10.6	3.7	14.3

Tableau IV.6 – Optimisation n°4 : besoins énergétiques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 30 et de l'individu initial

Les résultats obtenus sont meilleurs que ceux que nous avons présentés pour l'optimisation n°1, pour laquelle les besoins de chauffage, de refroidissement et totaux minimums obtenus valent 12.1, 3.7 et 31.9 kWh/(m².an) respectivement. Par rapport aux performances de l'individu initial, aux caractéristiques non optimisées, cette optimisation n°4 offre des solutions qui permettent de diminuer drastiquement les besoins de chauffage (- 79 % avec l'individu n°1), ceux de refroidissement (- 96 % avec l'individu n°18) ou l'ensemble de ces besoins (- 72 % avec l'individu n°11).

Les tableaux [IV.7](#) et [IV.8](#) présentent respectivement les valeurs des variables non géométriques (donc toutes sauf les pourcentages de surface vitrée et les profondeurs des brise-soleil) et géométriques des individus n°1, 18 et 11 repérés sur la [figure IV.19](#) ainsi que celles de l'individu initial, pour rappel. Dans le [tableau IV.8](#) les illustrations correspondent à la représentation de la façade concernée pour le dernier étage du bâtiment neuf, avec le *plug-in* d'OpenStudio pour SketchUp.

Individu	FS	Γ_{Murs}	$ep_{IsolMurs}$ [m]	Γ_{BS}	U_w [W/(m ² .K)]
initial	0.55	0.7	0.1	0.2	1.7
n°1 (besoins chauf. min.)	0.75	0.7	0.2	0.8	1.1
n°18 (besoins refroid. min.)	0.15	0.9	0.01	0.2	1.1
n°11 (besoins totaux min.)	0.15	0.9	0.2	0.2	1.1

Tableau IV.7 – Optimisation n°4 : valeurs des variables non géométriques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 30 et de l'individu initial.

On remarque pour les individus n°1, 18 et 11 que le pourcentage de surface vitrée et la profondeur de brise-soleil minimums ont presque toujours été choisis pour toutes les façades sauf la façade sud. Chez l'individu n°1, pour minimiser les besoins de chauffage cette façade sud est vitrée à 80 %, avec des brise-soleil aussi peu profonds que possible. Dans la même optique, le facteur solaire des vitrages est élevé, leur coefficient de déperdition thermique est minimal et l'épaisseur d'isolant sur


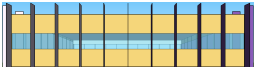
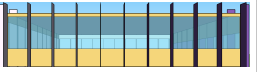
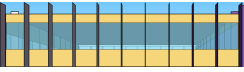
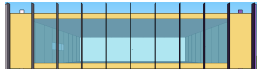



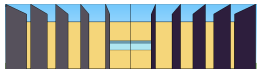
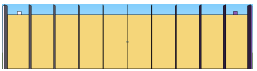


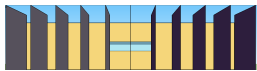


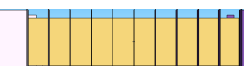
Indiv.	Façade sud	Façade nord	Façade est	Façade ouest
init.	$\tau_{SV} = 80 \%$ $Prof_{BS} = 0.5 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 30 \%$ $Prof_{BS} = 0.5 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 60 \%$ $Prof_{BS} = 0.5 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 50 \%$ $Prof_{BS} = 0.5 \text{ m}$ 
N°1	$\tau_{SV} = 80 \%$ $Prof_{BS} = 0.25 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 1 \%$ $Prof_{BS} = 0.25 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 1 \%$ $Prof_{BS} = 0.25 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 20 \%$ $Prof_{BS} = 0.25 \text{ m}$ 
N°18	$\tau_{SV} = 20 \%$ $Prof_{BS} = 2 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 1 \%$ $Prof_{BS} = 0.25 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 1 \%$ $Prof_{BS} = 0.25 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 1 \%$ $Prof_{BS} = 0.25 \text{ m}$ 
N°11	$\tau_{SV} = 20 \%$ $Prof_{BS} = 2 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 1 \%$ $Prof_{BS} = 0.5 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 1 \%$ $Prof_{BS} = 0.25 \text{ m}$ 	$\tau_{SV} = 1 \%$ $Prof_{BS} = 0.25 \text{ m}$ 

Tableau IV.8 – Optimisation n°4 : valeurs des variables géométriques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 30 et de l'individu initial.

les parois verticales opaques est maximale. L'albedo des brise-soleil est maximal⁹ pour augmenter la quantité d'énergie solaire entrant dans le bâtiment après réflexion sur leur surface.

Chez l'individu n°18, pour minimiser les besoins de refroidissement tout est fait pour qu'un minimum de rayonnement solaire pénètre dans le bâtiment : le pourcentage de vitrage sur la façade sud est réduit à 20 % et la profondeur des brise-soleil sur cette façade est maximale. L'albedo des brise-soleil est minimal. Celui du revêtement extérieur des parois opaques est maximal, ce qui signifie que ce revêtement absorbe très peu d'énergie issue du flux solaire incident. Ceci a son importance ici car l'épaisseur d'isolant étant très faible, la chaleur absorbée par ce revêtement peut plus facilement être transmise à l'intérieur du bâtiment.

Chez l'individu n°11, on constate que les valeurs des variables sont quasiment toutes identiques à celles de l'individu n°18, à part pour l'épaisseur d'isolant qui est maximale au lieu d'être minimale et pour la profondeur des brise-soleil sur la façade Nord, ce qui a certainement très peu d'influence car cette façade n'est pas vitrée. Ceci est remarquable, car l'individu n°18 n'est pas seulement celui pour lequel les besoins de climatisation du bâtiment neuf sont les plus faibles, c'est aussi celui pour lequel les besoins de chauffage sont les plus élevés. Ainsi, on diminue ces besoins de 96.8 à 10.6 kWh/(m².an) en passant de 0.01 à 0.2 m d'isolant, ce qui rappelle le caractère primordial de l'isolation.

Par ailleurs, les solutions présentées sont certes optimales pour minimiser les besoins de chauffage, de refroidissement ou la somme des deux, mais des concepteurs de bâtiments risquent d'être peu satisfaits de ces propositions. En effet, pour les individus n°18 et 11 en particulier, les sur-

9. Pour cette optimisation la variable Γ_{BS} pouvaient prendre les valeurs 0.2, 0.4, 0.6 et 0.8 et non pas 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ou 0.9 comme indiqué dans la partie 2.2.1 de ce chapitre.

faces de vitrages sont si réduites que l'accès à l'éclairage naturel des occupants du bâtiment est extrêmement faible. Ceci a un impact non seulement sur leur bien-être, mais aussi sur l'éclairage artificiel nécessaire pour garantir un niveau de luminosité suffisant dans le bâtiment. Ces équipements d'éclairage artificiel dégagent de la chaleur lorsqu'ils fonctionnent, donc la minimisation des surfaces de vitrage augmente ces apports de chaleur.

Dans les optimisations présentées jusqu'ici, le modèle utilisé est PinED, dans lequel le niveau d'éclairage artificiel est constant et non modulé en fonction de l'éclairage naturel reçu à travers les surfaces vitrées. Ce choix a été fait pour harmoniser les hypothèses de conception prises avec E+, P+C et la PFM. En effet, la prise en compte de l'éclairage naturel pour moduler l'éclairage artificiel utilisé n'est pas possible pour l'instant dans la PFM. Cette fonctionnalité est présente dans P+C et dans E+ mais les modalités de calcul de l'éclairage naturel reçu sont différentes. Nous présentons dans la partie suivante dans quelle mesure ces aspects peuvent être pris en compte dans E+, et comment cela peut influencer sur les résultats des optimisations.

3.2.2 Prise en compte de l'éclairage naturel

Pour moduler l'éclairage artificiel en considérant l'éclairage naturel dans E+, il faut placer un ou deux points de référence dans la zone étudiée. En chacun de ces points, le logiciel détermine le niveau d'éclairage lumineux reçu (en lux) en prenant en compte l'éclairage qui arrive directement à travers les surfaces vitrées sur ces points ainsi que celui qui est réfléchi sur le sol de la pièce. Si le calcul d'une réflexion CLO sur toutes les surfaces extérieures est activé dans E+ - comme c'est le cas pour la version 1b que nous étudions ici - alors le flux lumineux réfléchi par les surfaces extérieures et transmis par les surfaces vitrées est pris en compte.

Ensuite, E+ détermine l'éclairage artificiel nécessaire pour combler la différence entre le niveau d'éclairage lumineux exigé dans la pièce et celui effectivement reçu grâce à l'éclairage naturel. A partir de ce calcul, un facteur de réduction de l'éclairage électrique dans la zone concernée est transmis au module de calcul thermique, qui l'utilise pour réduire la quantité de chaleur dégagée par l'éclairage artificiel. La proportion de la zone concernée par la réduction issue du calcul effectué pour un point de référence est à définir pour chaque point.

Dans notre cas, nous avons défini deux points de référence par étage du bâtiment neuf, du troisième étage jusqu'au dernier, et chacun d'eux couvre 50 % de la zone thermique dans laquelle il est placé. Ceci signifie que l'intégralité de cette zone sera impactée par les réductions d'apports de chaleurs liés à l'éclairage électrique. Nous avons placé ces deux points de référence face à la façade nord. Nous aurions aimé pouvoir placer plusieurs points de référence face à chacune des façades, afin d'homogénéiser les exigences d'éclairage lumineux dans chaque zone. Ceci n'était cependant pas possible car on ne peut pas définir plus de deux points de référence par zone dans E+. Le choix de la façade nord est lié aux résultats obtenus lors de l'optimisation n°4, pour laquelle toutes les solutions présentées suppriment la surface de vitrage au nord. Par ailleurs, de manière générale dans les bâtiments la façade nord est souvent la plus faiblement vitrée. Il nous semble alors intéressant d'estimer quels seraient les choix de conception les plus pertinents pour un bâtiment dans lequel

on aurait des exigences sur l'éclairage lumineux à proximité de la façade nord, comme cela peut être le cas dans des bâtiments de bureaux.

La position exacte des deux points de référence que nous avons définis à chaque étage est précisée sur la [figure IV.20](#). Ces points sont placés à une hauteur de 1 m. Le niveau d'éclairage lumineux à atteindre que nous avons choisi pour ces points est de 300 lx. Le premier et le deuxième étage ne sont pas équipés de points de référence car leur façade nord est mitoyenne à la façade sud du bâtiment 1.

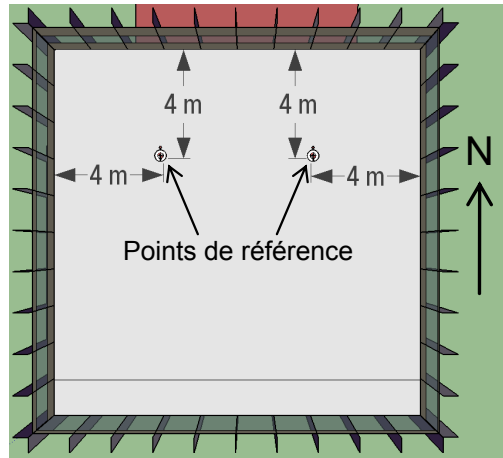


Figure IV.20 – Position des points de référence pour le contrôle de l'éclairage artificiel, par rapport aux façades nord, ouest et est au dernier étage du bâtiment neuf.

Ces modifications apportées au bâtiment neuf dans la version 1b du modèle PinED ont un impact sur ses besoins énergétiques. Après cette opération, les besoins de chauffage et de refroidissement de l'ensemble de ce bâtiment valent 30.0 et 19.0 kWh/(m².an) respectivement, contre 27.6 et 22.9 kWh/(m².an) auparavant. La prise en compte de l'éclairage naturel diminue l'éclairage électrique utilisé ainsi que la chaleur dissipée par les équipements correspondants, d'où une augmentation des besoins de chauffage et une diminution de ceux de refroidissement. Au final, cela se traduit par une légère baisse des besoins énergétiques totaux, qui passent de 50.5 à 49.0 kWh/(m².an).

3.2.2. i) *Optimisation n°5 : besoins énergétiques du bâtiment neuf, variables $\Gamma_{Murs} / \Gamma_{BS} / \tau_{SV} / Prof_{BS} / ep_{IsolMurs} / Type_w$*

Le cinquième problème d'optimisation que nous présentons ici vise à nouveau à minimiser les besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment neuf, mais cette fois-ci l'utilisation de l'éclairage artificiel est modulée en fonction de l'éclairage naturel selon les modalités présentées ci-dessus. Jusqu'ici, la transmission lumineuse des vitrages ne faisait pas partie des variables des problèmes d'optimisation présentés. Dans le cas présent, nous prenons en compte cette variable TL à travers le type de vitrage $Type_w$. Ainsi, le coefficient de déperdition thermique des vitrages U_w et leur facteur solaire FS ne varient plus indépendamment les uns des autres. NSGA-II peut choisir entre neuf valeurs de $Type_w$, chacune d'elle faisant référence à un trio de valeurs pour U_w , FS et TL tel qu'indiqué dans le [tableau IV.2 de la partie 3.1.1 de ce chapitre](#). Le dernier point qui différencie

cette optimisation n°5 de la précédente est qu'un type de vitrage différent peut être choisi pour chaque façade, alors qu'auparavant les vitrages de toutes les façades avaient forcément les mêmes valeurs de U_w et FS .

Nous avons arrêté le processus d'optimisation à la génération 22 car l'hypervolume des populations ne progressait quasiment plus depuis plusieurs générations. Comme pour l'optimisation n°4, le nombre de combinaisons possible est énorme. Finalement, 378 individus ont été évalués (sur 460 individus différents possibles) en 6 jours et 14 heures. Le taux de doublons est donc de 18 %. La figure IV.21 montre le front de Pareto obtenu pour la génération 22, ainsi que la position de « l'individu initial modifié », c'est à dire l'individu initial auquel on a ajouté la prise en compte de l'éclaircement naturel comme indiqué auparavant.

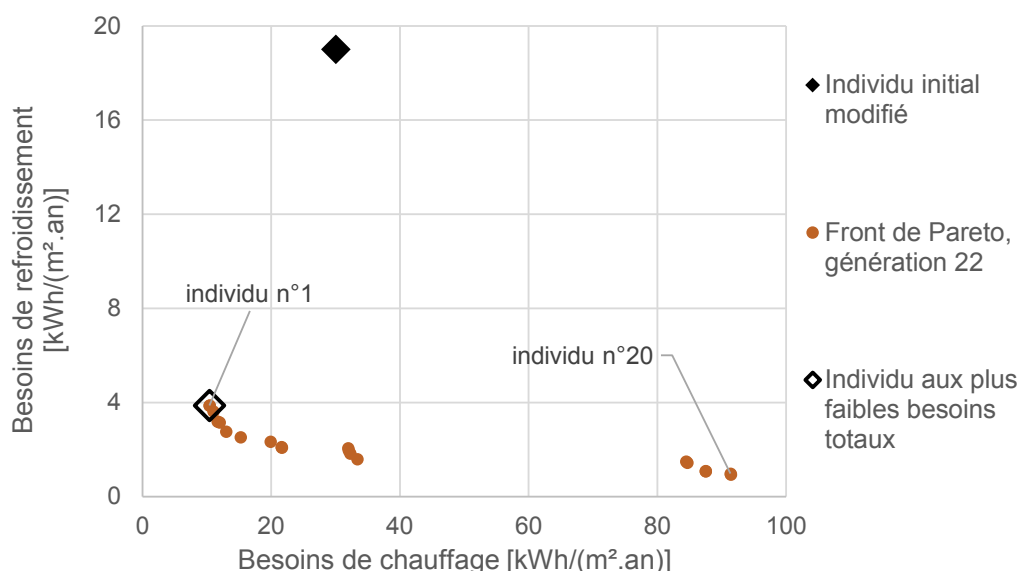


Figure IV.21 – Optimisation n°5 : individu initial, avant optimisation et front de Pareto obtenu pour la population de la génération 22.

Le tableau IV.9 présente les besoins énergétiques de l'individu n°1, qui a les besoins de chauffage et les besoins totaux les plus faibles, ainsi que ceux de l'individu n°20, qui a les besoins de refroidissement les plus faibles. Ceux de l'« individu initial modifié » sont aussi rappelés. Les gains permis par cette optimisation sont similaires à ceux obtenus pour l'optimisation n°4 en termes de besoins de refroidissement (- 95 %) et de besoins totaux (- 71 %). En revanche, ici l'algorithme n'a pas obtenu des besoins de chauffage plus bas que 10.4 kWh/(m².an), ce qui représente une baisse de 65 % par rapport à l'individu initial, contre 79 % dans l'optimisation n°4.

Individu	Besoins de chauffage [kWh/(m².an)]	Besoins de refroidissement [kWh/(m².an)]	Besoins totaux [kWh/(m².an)]
initial	30.0	19.0	49.0
n°1	10.4	3.9	14.3
n°20	91.4	0.9	92.3

Tableau IV.9 – Optimisation n°5 : besoins énergétiques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 22 et de l'individu initial modifié.

Le **tableau IV.10** présente les valeurs des variables Γ_{Murs} , $ePIsolMurs$ et Γ_{BS} des individus n°1, et 20 ainsi que celles de l'individu initial modifié, pour rappel. Les valeurs des variables FS , U_w et TL sont données dans le **tableau IV.11** pour chacune des façades, avec le numéro du vitrage correspondant au trio sélectionné. Le **tableau IV.12** présente les valeurs des variables géométriques de ces individus, avec les représentations de chaque façade pour le dernier étage du bâtiment neuf.

Individu	Γ_{Murs}	$ePIsolMurs$ [m]	Γ_{BS}
initial	0.7	0.1	0.2
n°1 (besoins chauff. et tot. min.)	0.7	0.2	0.3
n°20 (besoins refroid. min.)	0.7	0.01	0.1

Tableau IV.10 – Optimisation n°5 : valeurs des variables Γ_{Murs} , $ePIsolMurs$ et Γ_{BS} des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 22 et de l'individu initial modifié.

Ind.	Façade sud	Façade nord	Façade est	Façade ouest
init.	Vitrage initial $FS=0.55$ $TL=0.68$ $U_w=1.7$ W/(m ² .K)	idem	idem	idem
n°1	Vitrage n°7 $FS=0.28$ $TL=0.33$ $U_w=1.1$ W/(m ² .K)	Vitrage n°5 $FS=0.34$ $TL=0.61$ $U_w=1.0$ W/(m ² .K)	Vitrage n°6 $FS=0.28$ $TL=0.52$ $U_w=1.0$ W/(m ² .K)	Vitrage n°8 $FS=0.23$ $TL=0.41$ $U_w=1.1$ W/(m ² .K)
n°20	Vitrage n°2 $FS=0.76$ $TL=0.81$ $U_w=2.8$ W/(m ² .K)	Vitrage n°6 $FS=0.28$ $TL=0.52$ $U_w=1.0$ W/(m ² .K)	Vitrage n°7 $FS=0.28$ $TL=0.33$ $U_w=1.1$ W/(m ² .K)	Vitrage n°2 $FS=0.76$ $TL=0.81$ $U_w=2.8$ W/(m ² .K)

Tableau IV.11 – Optimisation n°5 : valeurs des variables non géométriques des vitrages des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 22 et de l'individu initial modifié.

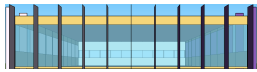
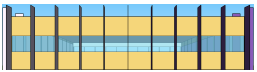


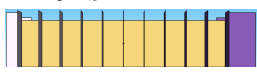

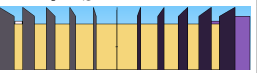
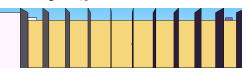

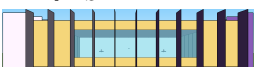


Indiv.	Façade sud	Façade nord	Façade est	Façade ouest
init.	$\tau_{SV} = 80$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 	$\tau_{SV} = 30$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 	$\tau_{SV} = 60$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 	$\tau_{SV} = 50$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 
n°1	$\tau_{SV} = 1$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 	$\tau_{SV} = 20$ % $Prof_{BS} = 2$ m 	$\tau_{SV} = 1$ % $Prof_{BS} = 2$ m 	$\tau_{SV} = 1$ % $Prof_{BS} = 1$ m 
n°20	$\tau_{SV} = 1$ % $Prof_{BS} = 0.25$ m 	$\tau_{SV} = 60$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 	$\tau_{SV} = 20$ % $Prof_{BS} = 2$ m 	$\tau_{SV} = 1$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 

Tableau IV.12 – Optimisation n°5 : valeurs des variables géométriques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 22 et de l'individu initial modifié.

On remarque que par rapport à l'optimisation n°4, l'individu pour lequel les besoins de chauffage et totaux (le n°1) du bâtiment neuf sont minimisés n'a plus de surface vitrée au sud ni à l'ouest. Le pourcentage de surface vitrée au nord a légèrement augmenté, mais ce vitrage a le facteur solaire et la transmission lumineuse les plus faibles possibles et des brise-soleil très larges viennent le masquer.

La prise en compte de l'éclairage naturel pour moduler l'éclairage artificiel pousse finalement à minimiser la quantité de lumière qui entre dans la pièce pour maximiser la chaleur apportée par l'éclairage artificiel et diminuer les besoins de chauffage.

Les caractéristiques de l'individu pour lequel les besoins de refroidissement sont minimisés (n°20) diffèrent aussi de celles obtenues pour l'optimisation n°4, car cette fois la façade sud n'est plus du tout vitrée, la façade ouest l'est légèrement et surtout la façade nord est largement vitrée. De plus, cette façade nord est équipée d'un vitrage ayant une grande transmission lumineuse. Ceci permet d'améliorer l'éclairage naturel reçu au niveau des points de référence, donc de diminuer l'éclairage artificiel nécessaire dans toutes les pièces concernées. Les apports de chaleurs liés aux dispositifs d'éclairage électrique sont donc diminués, ce qui allège les besoins de refroidissement du bâtiment.

Cependant, la minimisation des besoins de refroidissement fait face à une contradiction pour les façades susceptibles de recevoir une quantité non négligeable de rayonnement solaire, c'est à dire toutes sauf la façade nord. En effet, maximiser les surfaces vitrées sur ces façades aurait permis de diminuer la chaleur dégagée par l'éclairage artificiel, mais cela aurait augmenté les apports solaires par ces vitrages. Pour cet individu n°20, le choix a été fait de minimiser les apports solaires avec des surfaces vitrées faibles, voire quasi inexistantes. L'optimisation suivante étudie les solutions obtenues en minimisant cette fois d'un côté les besoins de chauffage, et de l'autre la chaleur apportée par l'éclairage artificiel.

3.2.2. ii) Optimisation n°6 : besoins de chauffage et chaleur dégagée par l'éclairage artificiel du bâtiment neuf, variables Γ_{Murs} / Γ_{BS} / τ_{SV} / $Prof_{BS}$ / $ep_{IsolMurs}$ / $Type_w$

Les variables considérées dans ce problème sont les mêmes que dans le problème précédent. La première fonction objectif reste la minimisation des besoins de chauffage du bâtiment neuf. La fonction objectif de minimisation des besoins de refroidissement du bâtiment neuf est remplacée par la minimisation de la quantité de chaleur apportée par les dispositifs d'éclairage artificiel dans le bâtiment neuf. Nous avons arrêté le processus d'optimisation à la génération 26 car l'hypervolume des populations ne progressait quasiment plus depuis la génération 21. Au terme de cette génération finale, le taux de doublons obtenus est 16 % et le temps de calcul final est de 7 jours et 14 heures. La [figure IV.22](#) montre le front de Pareto obtenu pour la génération 26.

Le [tableau IV.13](#) présente les performances des individus n°1 (qui permet de minimiser les besoins de chauffage), 20 (qui permet de minimiser la chaleur dégagée par l'éclairage artificiel), 9 (qui permet de minimiser la somme de ces deux grandeurs) et 10. L'individu n°10 n'est associé à aucune minimisation, mais il présente un intérêt particulier que nous allons détailler par la suite.

Nous présentons ensuite les valeurs des variables des individus n°1, 20, 9 et 10. Les valeurs des variables Γ_{Murs} , $ep_{IsolMurs}$ et Γ_{BS} ne sont pas précisées pour chacun de ces individus car ils ont tous les mêmes, soit respectivement 0.7, 0.2 m et 0.7. Comme pour l'optimisation n°5, les valeurs des variables FS , U_w et TL sont données dans le [tableau IV.14](#) pour chacune des façades, avec le numéro du vitrage correspondant au trio sélectionné. Le [tableau IV.15](#) présente les valeurs des

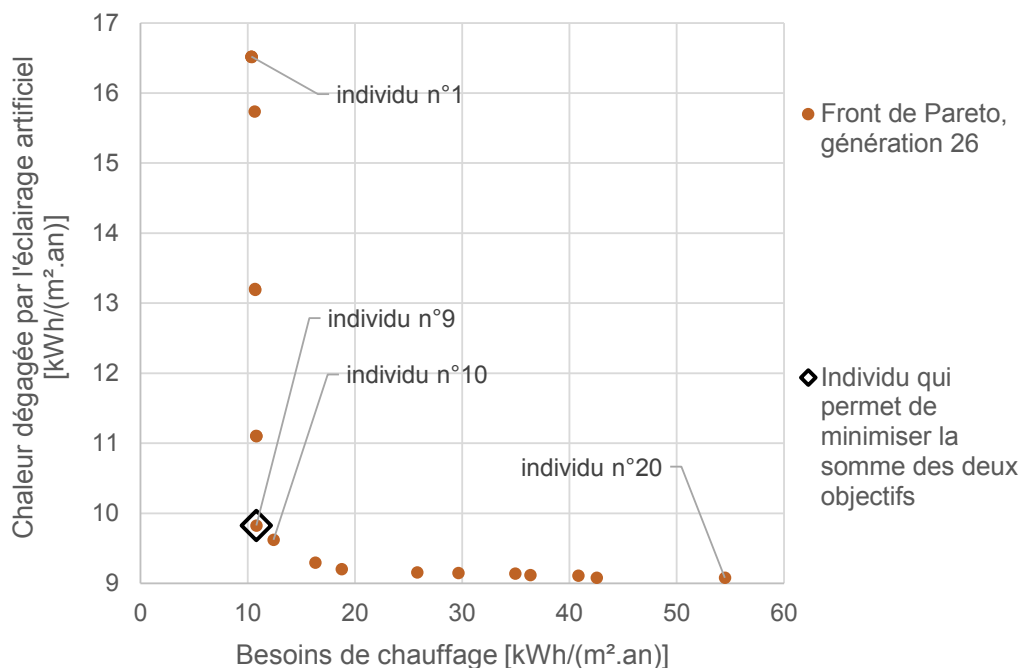


Figure IV.22 – Optimisation n°6, avec la minimisation de la chaleur dégagée par l'éclairage électrique à la place de la minimisation des besoins de refroidissement : front de Pareto obtenu pour la population de la génération 26.

Individu	Besoins de chauffage [kWh/(m².an)]	Chaleur dégagée par l'éclairage artificiel [kWh/(m².an)]	Somme des objectifs [kWh/(m².an)]
n°1	10.3	16.5	26.9
n°20	54.5	9.1	63.6
n°9	10.8	9.8	20.6
n°10	12.4	9.6	22.0

Tableau IV.13 – Optimisation n°6 : besoins énergétiques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 26 et de l'individu n°10.

variables géométriques de ces individus, avec une fois de plus les représentations de chaque façade pour le dernier étage du bâtiment neuf.

Etant donné que les variables autorisées et le modèle étudié dans l'optimisation précédente (n°5) et dans celle-ci (n°6) sont les mêmes, il est intéressant de comparer leurs résultats. Tout d'abord, on remarque que les performances atteintes sur l'objectif de minimisation des besoins de chauffage sont quasiment les mêmes dans les deux optimisations : on obtient 10.4 kWh/(m².an) pour la n°5 et 10.3 kWh/(m².an) pour la n°6. En revanche, les besoins de chauffage obtenus pour l'individu le plus performant vis-à-vis du deuxième critère sont beaucoup plus élevés pour l'optimisation n°5 (92.3 kWh/(m².an)) que pour la n°6 (54.5 kWh/(m².an)). Ceci s'explique par l'épaisseur d'isolant choisie pour cet individu : dans l'optimisation n°5, la valeur la plus faible (0.01 m) est choisie pour minimiser les besoins de refroidissement. Au contraire dans l'optimisation n°6 l'isolation n'impacte pas l'éclairement naturel reçu, donc l'épaisseur d'isolant est optimisée seulement vis-à-vis des besoins de chauffage ce qui se traduit par $ep_{IsolMurs} = 0.2$ m pour tous les individus.

Ind.	Façade sud	Façade nord	Façade est	Façade ouest
n°1	Vitrage n°4 $FS=0.40$ $TL=0.70$ $U_w=1.6$ W/(m ² .K)	Vitrage n°6 $FS=0.28$ $TL=0.52$ $U_w=1.1$ W/(m ² .K)	Vitrage n°4 $FS=0.40$ $TL=0.70$ $U_w=1.0$ W/(m ² .K)	Vitrage n°9 $FS=0.53$ $TL=0.62$ $U_w=0.7$ W/(m ² .K)
n°20	Vitrage n°3 $FS=0.55$ $TL=0.70$ $U_w=1.6$ W/(m ² .K)	Vitrage n°2 $FS=0.76$ $TL=0.81$ $U_w=2.8$ W/(m ² .K)	Vitrage n°1 $FS=0.86$ $TL=0.90$ $U_w=5.8$ W/(m ² .K)	Vitrage n°2 $FS=0.76$ $TL=0.81$ $U_w=2.8$ W/(m ² .K)
n°9	Vitrage n°3 $FS=0.55$ $TL=0.70$ $U_w=1.6$ W/(m ² .K)	Vitrage n°2 $FS=0.76$ $TL=0.81$ $U_w=2.8$ W/(m ² .K)	Vitrage n°5 $FS=0.34$ $TL=0.61$ $U_w=1.0$ W/(m ² .K)	Vitrage n°9 $FS=0.53$ $TL=0.62$ $U_w=0.7$ W/(m ² .K)
n°10	Vitrage n°4 $FS=0.40$ $TL=0.70$ $U_w=1.6$ W/(m ² .K)	Vitrage n°2 $FS=0.76$ $TL=0.81$ $U_w=2.8$ W/(m ² .K)	Vitrage n°4 $FS=0.40$ $TL=0.70$ $U_w=1.6$ W/(m ² .K)	Vitrage n°9 $FS=0.53$ $TL=0.62$ $U_w=0.7$ W/(m ² .K)

Tableau IV.14 – Optimisation n°6 : valeurs des variables non géométriques des vitrages des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 26 et de l'individu n° 10.


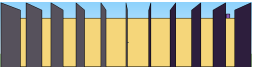



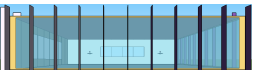
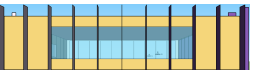
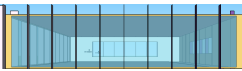

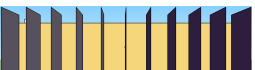
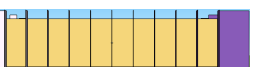
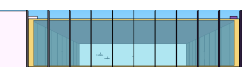

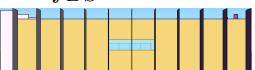


Indiv.	Façade sud	Façade nord	Façade est	Façade ouest
n°1	$\tau_{SV} = 1$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 	$\tau_{SV} = 1$ % $Prof_{BS} = 2$ m 	$\tau_{SV} = 1$ % $Prof_{BS} = 0.25$ m 	$\tau_{SV} = 20$ % $Prof_{BS} = 0.25$ m 
n°20	$\tau_{SV} = 40$ % $Prof_{BS} = 0.25$ m 	$\tau_{SV} = 95$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 	$\tau_{SV} = 60$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 	$\tau_{SV} = 95$ % $Prof_{BS} = 0.25$ m 
n°9	$\tau_{SV} = 1$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 	$\tau_{SV} = 1$ % $Prof_{BS} = 2$ m 	$\tau_{SV} = 1$ % $Prof_{BS} = 0.25$ m 	$\tau_{SV} = 95$ % $Prof_{BS} = 0.25$ m 
n°10	$\tau_{SV} = 40$ % $Prof_{BS} = 0.25$ m 	$\tau_{SV} = 20$ % $Prof_{BS} = 0.5$ m 	$\tau_{SV} = 20$ % $Prof_{BS} = 1$ m 	$\tau_{SV} = 95$ % $Prof_{BS} = 0.25$ m 

Tableau IV.15 – Optimisation n°6 : valeurs des variables géométriques des « meilleurs » individus du front de Pareto de la génération 26 et de l'individu n° 10.

Les résultats de ces deux optimisations montrent que pour minimiser les besoins de chauffage l'algorithme supprime la quasi totalité des surfaces vitrées, ce qui produit une solution avec un bâtiment neuf dans lequel peu de gens aimeraient vivre. Dans l'optimisation n°5, certains individus du dernier front de Pareto dont nous n'avons pas donné les caractéristiques ont un pourcentage de surface vitrée beaucoup plus important sur leurs façades, mais cela provoque une très forte augmentation des besoins de chauffage (+ 74 kWh/(m².an) au minimum). En revanche, dans l'optimisation n°6 les besoins de chauffage ont très peu augmenté (+ 0.5 kWh/(m².an)) entre l'individu n°1 et l'individu n°9, pour une surface vitrée quatre fois plus importante qui permet de diminuer nettement le recours à l'éclairage artificiel mais aussi d'augmenter le confort visuel des occupants.

En se focalisant cette fois sur l'optimisation n°6 dont nous avons présenté les résultats dans cette partie, on remarque que pour minimiser la chaleur dégagée par l'éclairage artificiel la transmission lumineuse des vitrages de l'individu n°20 est particulièrement élevée. Entre l'individu n°20 et l'individu n°9, la diminution des besoins de chauffage (passage de 54.5 à 10.8 kWh/(m².an)) s'explique non seulement par la suppression des surfaces vitrées au nord et à l'est, mais aussi par la forte diminution du coefficient de déperdition thermique des vitrages de la façade ouest, qui passe de 2.8 à 0.7 W/(m².an). Enfin, le principal intérêt de l'individu n°10 est que par rapport à l'individu n°9 il permet d'augmenter considérablement le pourcentage de surface vitrée des façades sud, nord et est en provoquant seulement une faible augmentation des besoins de chauffage (+ 1.6 kWh/(m².an)). Ceci est un faible sacrifice pour une grande augmentation du confort visuel des occupants qui auraient leur bureau à proximité de ces façades.

3.2.3 Commentaires

Les six optimisations que nous avons présentées dans cette partie illustrent comment notre méthode d'optimisation pourrait être utilisée pour aider efficacement à la conception de projets de densification urbaine. Ainsi, les optimisations n°2 et n°3 permettent d'évaluer dans quelle mesure la conception du bâtiment neuf (à morphologie fixée) impacte les besoins énergétiques du bâtiment existant repéré précédemment comme étant le plus sensible à l'opération de densification. Ces impacts sont faibles, mais l'exercice mériterait d'être reproduit sur chacun des bâtiments existants dont les besoins énergétiques sont modifiés de façon non négligeable par l'intégration du bâtiment neuf dans le quartier. Ceci permettrait d'estimer les conséquences globales de la variation des paramètres de conception du bâtiment neuf sur le bilan énergétique de ses voisins.

Les optimisations n°1 et 4 se placent cette fois du côté du bâtiment neuf et l'analyse de leurs résultats montre que l'algorithme génétique permet d'obtenir des individus avec des besoins énergétiques beaucoup plus faibles que ceux de l'individu initial. L'obtention d'un ensemble diversifié de solutions finales toutes quasi-optimales renseigne sur les choix qui permettent de minimiser soit les besoins de chauffage, soit ceux de refroidissement, soit la somme de ces deux grandeurs. Des compromis intermédiaires sont aussi obtenus et seraient intéressants à analyser.

L'optimisation n°4 a mis en évidence les limites d'une optimisation énergétique de la conception d'un bâtiment dans lequel l'éclairement naturel n'est pas pris en compte pour moduler l'éclairage électrique utilisé. Les optimisations n°5 et 6 se font donc avec une version modifiée du modèle PinED, dans laquelle le bilan énergétique des 7 derniers étages du bâtiment neuf est évalué avec un éclairage artificiel actif seulement si les exigences d'éclairement lumineux ne sont pas comblées par l'éclairement naturel. Les résultats de ces deux derniers tests montrent que cette modification du modèle a un fort impact sur les caractéristiques des solutions obtenues au terme du processus d'optimisation. L'analyse des résultats de l'optimisation n°6 met en évidence que la priorisation de l'accès à l'éclairement naturel dans la conception d'un bâtiment est une tâche complexe.

Pour développer davantage cette démarche, il faudrait tester d'autres positions pour les points de référence qui guident le calcul de l'éclairage artificiel nécessaire à chaque instant. En effet, le

positionnement de ces points a une forte influence sur le choix des valeurs des variables de conception de chaque façade qui ont un impact sur l'éclairage naturel reçu dans le bâtiment. Par ailleurs, les impacts de la conception du bâtiment neuf sur le bâtiment 15 ont été évalués dans les optimisations n°2 et 3 avec un éclairage artificiel constant dans ce bâtiment existant. On pourrait donc effectuer des tests similaires en considérant cette fois les apports de l'éclairage naturel dans le calcul de l'éclairage artificiel nécessaire pour garantir un éclairage lumineux suffisant dans le bâtiment 15.

Enfin, les critères des optimisations que nous avons traitées concernaient à chaque fois soit le bâtiment neuf, soit le bâtiment 15. L'objectif de notre méthode étant d'optimiser la conception du bâtiment neuf à la fois vis-à-vis de ses performances mais aussi de celles des bâtiments existants, des tests allant dans ce sens pourraient être réalisés. On pourrait ainsi minimiser simultanément les besoins énergétiques totaux du bâtiment neuf et ceux du bâtiment 15, ou bien l'utilisation de l'éclairage électrique pour chacun d'entre eux, etc. De plus, nous n'avons pas considéré de critère de performance bioclimatique, comme le taux d'exploitation de la ressource solaire pour combler les besoins de chauffage d'un bâtiment. Aucun verrou technique n'empêche d'implémenter le calcul de ce taux dans le couplage entre E+ et NSGA-II mais nous n'avons pas mis ce développement en priorité dans nos travaux car nous savions que de telles évaluations seraient réalisables avec la PFM. Cette dernière nous paraît plus pertinente pour évaluer un indicateur comme le taux d'exploitation de la ressource solaire, car elle permet de calculer plusieurs inter-réflexions solaires sur les parois des bâtiments, ce qui va impacter ce taux.

Nous avons indiqué pour chacune des optimisations présentées le taux de doublons et le temps de calcul total obtenus. Lorsque l'espace des possibles du problème d'optimisation est du même ordre de grandeur que le nombre maximum d'individus différents que NSGA-II peut générer, on s'attend intuitivement à ce que le nombre de doublons produits lors de l'optimisation soit important. C'est effectivement le cas pour les optimisations n°1 et 2 de la [partie 3.2.1](#), pour lesquelles les taux de doublons sont de 70 et 80 % respectivement. La non évaluation de ces doublons a donc permis de réduire le temps de calcul total de 9 et 7 jours pour les optimisations n°1 et 2 respectivement, par rapport aux 10 jours et 18 h de calculs qui auraient été nécessaires à l'évaluation de tous les individus à chaque génération, doublons compris.

Les problèmes qui sont traités dans les optimisations n°3 et 4 mettent en jeu d'avantage de variables, ce qui fait que l'espace des possibles devient des milliers de fois plus grand que le nombre maximum d'individus différents qui peuvent être générés. Malgré cela, le taux de doublons reste non négligeable et le temps gagné en évitant de les simuler aussi : on obtient des taux de 31 et 29 % ainsi que des gains de temps de 1 jour 10 heures et 3 jours 4 heures pour les optimisations n°3 et 4 respectivement. On voit donc tout l'intérêt en termes de temps de calcul qu'apporte cette manœuvre pour ne pas évaluer les doublons.

3.3 Développements en cours au sein du projet MERUBBI

3.3.1 Espace des possibles

Certaines des variables des problèmes d'optimisation que l'utilisateur de la PFM pourra traiter sont semblables à celles que nous avons considérées dans les exemples précédents. Il sera par exemple possible de faire varier l'épaisseur d'isolant dans les parois du bâtiment neuf. L'albedo des parements extérieurs de ces parois pourra aussi être modifié, par substitution d'un parement avec un autre. Cependant, nous avons expliqué dans [la partie 2.1 du chapitre III](#) que dans la PFM, les flux solaires incidents sur chaque surface sont pré-calculés par PT_M et ne sont donc pas calculés à chaque STD. Dans le modèle Modelica utilisé pour la STD avec Dymola, l'albedo des parois est pris en compte pour calculer la partie absorbée et la partie réfléchi du rayonnement solaire incident. Par conséquent, si l'algorithme NSGA-II modifie l'albedo du parement extérieur d'un mur du bâtiment neuf ceci modifiera la part du rayonnement solaire incident absorbée par ce parement, mais ce rayonnement incident ne sera pas recalculé même si par inter-réflexions solaires il pourrait être impacté par le changement d'albedo. Pour les mêmes raisons, un tel changement d'albedo n'aura pas d'impact sur le flux solaire incident sur les parois des bâtiments voisins du bâtiment neuf.

Les vitrages pourront être modifiés par substitution, comme nous l'avons fait en modifiant la variable $Type_w$. Comme pour la modification de l'albedo des parois, l'augmentation ou la diminution du facteur solaire d'un vitrage du bâtiment neuf impactera la quantité de flux solaire transmise et absorbée par la fenêtre mais pas le rayonnement CLO réfléchi vers les bâtiments voisins. En revanche, le bilan énergétique du bâtiment neuf sera modifié, ce qui aura un impact sur les échanges GLO entre lui et les bâtiments voisins.

D'autres variables que nous n'avons pas utilisées pourront être choisies. L'albedo du parement intérieur utilisé dans le nouveau bâtiment sera modifiable par substitution avec un autre parement intérieur. De plus, l'émissivité thermique du parement extérieur pourra être changée lors du processus d'optimisation, de façon couplée avec l'albedo de ce parement car le changement s'opérera également par substitution. Ceci a du sens dans la PFM car l'émissivité thermique du matériau qui compose une surface a un impact sur le flux GLO échangé par cette surface avec celles qu'elle « voit ». Les échanges GLO entre bâtiments peuvent être pris en compte dans la PFM donc ce paramètre pourrait avoir un impact sur le bilan énergétique des bâtiments voisins du bâtiment neuf. Enfin, il sera possible de remplacer un système constructif par un autre, c'est à dire de passer d'une isolation par l'intérieur à une isolation par l'extérieur, ou de remplacer une structure en béton par une structure en bois, etc. Cela se fera par substitution, et si cette option est choisie il ne sera alors plus possible de faire varier l'épaisseur d'isolant, ni les parements extérieurs et intérieurs.

Les variables que nous avons citées auront un impact non seulement sur les performances énergétiques et bioclimatiques du bâtiment neuf (et éventuellement sur celles des bâtiments existants) mais aussi sur ses performances économiques, comme nous allons le voir par la suite. La variable qui concerne l'épaisseur d'isolant est continue, c'est à dire qu'on risque d'obtenir des solutions optimales mais dont les caractéristiques ne correspondent pas à des valeurs réalistes. L'équipe du projet

MERUBBI a fait ce choix car la PFM a pour première vocation d'être une plateforme de recherche, dont il serait dommage de trop contraindre les possibilités. Par ailleurs, les coûts des matériaux de construction ayant été définis pour un nombre limité d'épaisseurs, une interpolation sera réalisée pour attribuer des coûts aux matériaux dont les épaisseurs ne sont pas répertoriées.

Enfin, dans la PFM certaines variables ne peuvent pas être pris en compte pour minimiser les besoins énergétiques d'un nouveau bâtiment. C'est le cas pour la taille et la position des surfaces vitrées ou des protections solaires dont seraient équipées certaines parois. La modification de ces paramètres influencerait sur les flux solaires reçus directement par les parois vitrées et opaques, ainsi que sur les inter-réflexions solaires entre ces parois et les autres surfaces de la scène (sol, parois des bâtiments voisins, protections solaires...). Or, nous avons rappelé ci-dessus que ces flux CLO ne sont pas calculés à chaque itération de l'algorithme d'optimisation car leurs valeurs sont pré-calculées par PT_M et contenues dans le gbXML_M. Cependant, ceci ne constitue pas une limite intrinsèque de la plateforme et le calcul des flux solaires incidents pour chaque nouvel individu créé par NSGA-II pourrait être implémenté à l'avenir. De la même façon, l'espace des possibles que nous venons de décrire a été défini par l'équipe du projet MERUBBI pour obtenir une première version opérationnelle de la PFM. Il pourra être enrichi par la suite.

3.3.2 Optimisation énergétique et bioclimatique

De façon similaire aux optimisations réalisées avec E+ que nous avons présentées, la PFM permettra de réaliser des optimisations avec deux fonctions objectifs. Parmi ces fonctions, on pourra par exemple choisir de minimiser les besoins de chauffage, de refroidissement et totaux (chauffage + refroidissement) du bâtiment neuf, d'un bâtiment existant ou de l'ensemble des bâtiments existants. Il sera ainsi possible d'analyser simultanément l'impact des variables de conception sur les besoins énergétiques du bâtiment neuf et ceux des bâtiments déjà présents dans l'îlot urbain.

Dans [la partie 4.2 du chapitre II](#) nous avons présenté le projet MERUBBI comme étant attentif à l'intégration de l'exploitation des ressources utiles de l'environnement parmi les critères d'optimisation des projets de densification urbaine. La PFM permettra donc de choisir comme fonction objectif la maximisation de certains critères de performance bioclimatique, comme le taux d'exploitation de la ressource solaire par le bâtiment pour couvrir ses besoins de chauffage annuels. Les étapes de calcul de cet indicateur ont été décrites dans [la partie 4.1 du chapitre II](#).

Dans le cadre du projet MERUBBI, nous avons testé la faisabilité du couplage de l'algorithme NSGA-II de l'environnement DEAP avec Dymola et la bibliothèque BuildSysPro, en collaboration avec EDF R&D. Le cas d'étude utilisé pour tester le processus d'optimisation était un bâtiment en forme de pavé dessiné comme bâtiment existant dans un modèle simplifié du projet « Nantes Moyennement Dense » conçu par des étudiants de l'ENSAV. Nous avons présenté le modèle final de ce projet dans [la partie 3.3.1 du chapitre II](#). La [figure IV.15](#) montre la position du bâtiment optimisé sur le modèle réalisé par les étudiants de l'ENSAV. Le bâtiment est considéré comme étant constitué d'un unique volume (400 m² de surface au sol et 13 m de hauteur), avec une seule zone thermique. Les 21 autres bâtiments représentés sur la [figure IV.15](#) ont aussi été modélisés, avec une

seule zone thermique par bâtiment. Les ombres portées par ces bâtiments sur le bâtiment optimisé ainsi que les inter-réflexions solaires sont prises en compte mais les échanges radiatifs GLO entre les bâtiments ne sont pas calculés. La mise en données de tous les bâtiments est très simplifiée : aucun apport interne n'est pris en compte, une température de consigne de 19 °C pour le chauffage et un taux de renouvellement d'air de 0.75 vol/h sont imposés en continu toute l'année.

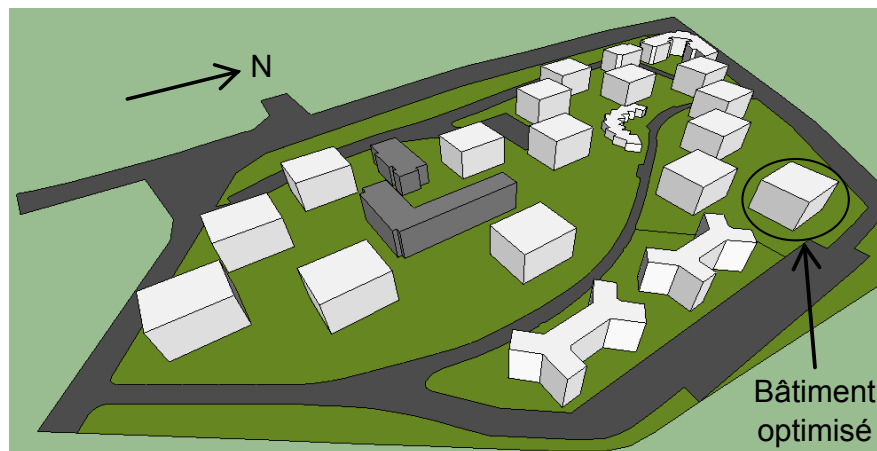


Figure IV.23 - Modèle simplifié de « Nantes Moyennement Dense » réalisé avec SketchUp par des élèves de l'ENSAV.

Les fonctions objectifs utilisées pour ce test sont la minimisation des besoins de chauffage résiduels¹⁰ du bâtiment d'une part et la maximisation de son taux d'exploitation de la ressource solaire pour couvrir ses besoins de chauffage annuels d'autre part. Lors de ce test, ce taux a été calculé grâce à un script Python écrit par EDF R&D, qui constituait une première version de la future brique de calcul de performance bioclimatique de la PFM. Afin de conserver un problème de minimisation de deux critères, comme tous les problèmes d'optimisation que nous avons détaillé dans ce manuscrit, la deuxième fonction objectif considérée ici est en fait une minimisation de l'opposé de ce taux d'exploitation. Les variables du problème d'optimisation sont l'épaisseur d'isolant sur les murs $ep_{IsolMurs}$ ainsi que le pourcentage de surface vitrée τ_{SV} sur chacune des façades. Ce sont des variables continues, $ep_{IsolMurs}$ peut varier de 0.05 à 0.4 m et τ_{SV} de 1 à 99 %.

L'optimisation s'effectue avec une population de 80 individus par génération, une probabilité de croisement de 0.9 et une probabilité de mutation de 0.05. Le critère d'arrêt est un nombre de générations fixé à 70. La figure IV.24 montre le front de Pareto obtenu pour la génération 69 et le tableau IV.16 détaille les caractéristiques et les performances des individus repérés sur cette figure.

L'individu n°1 permet de maximiser le taux d'exploitation de la ressource solaire en maximisant les surfaces de vitrages sur toutes les façades. L'individu n°77 permet de minimiser les besoins de chauffage résiduels. Sa façade sud est elle aussi entièrement vitrée, mais le pourcentage de surface vitrée sur les autres façades est réduit au minimum. Une solution intermédiaire est obtenue en vitrant les façades sud et ouest en totalité, la façade est à moitié et en laissant la façade nord quasiment opaque.

10. Les besoins de chauffage résiduels sont les besoins de chauffage annuels obtenus par la STD classique en considérant l'environnement du bâtiment avec toutes ses ressources, dont la ressource solaire. Ils interviennent dans le calcul du taux d'exploitation de la ressource solaire, comme nous l'avons expliqué dans la partie 4.1 du chapitre II.

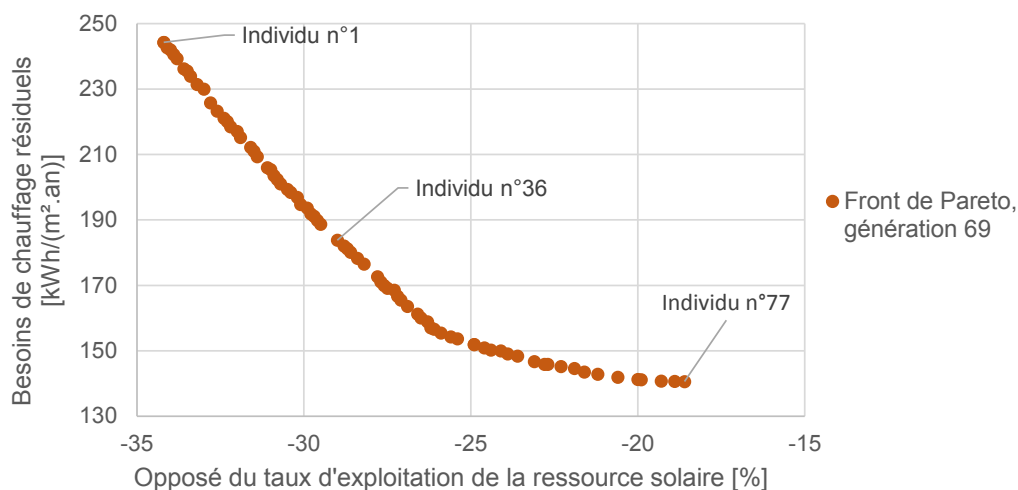


Figure IV.24 – Front de Pareto obtenu pour la population de la génération 69, test d'optimisation avec NSGA-II et Dymola-BuildSysPro.

Individu	$ePI_{solMurs}$ [m]	τ_{SV} [%]				- Taux d'exploitation [%]	Besoins de chauffage résiduels [kWh/(m ² .an)]
		sud	nord	ouest	est		
n°1	0.4	99	98	99	98	-34.2	244.3
n°36	0.4	99	5	99	55	-29.0	183.8
n°77	0.4	99	1	2	1	-18.6	140.6

Tableau IV.16 – Valeurs des variables et performances des individus n° 1, 36 et 77 du front de Pareto de la génération 69, test d'optimisation avec NSGA-II et Dymola-BuildSysPro.

À terme, il sera possible de réaliser de telles optimisations à la fois énergétiques et bioclimatiques avec la PFM. Comme nous l'avons déjà indiqué, la taille et la position des surfaces vitrées ne sont pour l'instant pas des variables prévues dans la PFM. Nous venons cependant de voir que la résolution de cet inconvénient, qu'aucun verrou technique ne vient *a priori* empêcher, serait intéressante dans une perspective d'optimisation des performances bioclimatiques des projets de densification urbaine.

3.3.3 Vers l'intégration de la performance économique

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre I de cette thèse, la littérature que nous avons passée en revue ne mentionne pas l'existence d'outil d'optimisation économique à l'échelle du quartier. Or, nous avons souligné dans la partie 2.1.1 du chapitre II l'intérêt de prendre en compte la performance économique dans une méthode d'aide à la conception des projets de densification urbaine. Pour répondre à ce besoin, la PFM offrira la possibilité de choisir la minimisation du coût global sur 30 ans du projet de construction du bâtiment neuf.

Ce coût sera la somme des coûts suivants :

- le coût des consommations d'eau et d'énergie liées à l'utilisation du bâtiment, qui sera calculé sur la base des besoins énergétiques issus de la STD ;

- le coût d'exploitation du bâtiment hors consommations d'eau et d'énergie, qui rassemble les coûts de vérification des équipements du bâtiment et son nettoyage ;
- le coût de maintenance de tous les éléments du bâtiment ;
- le coût de remplacement de ces éléments ;
- le coût d'investissement total.

L'intégration de ces calculs économiques dans la PFM illustre bien la richesse et la complexité d'une plateforme interdisciplinaire. En effet, les règles de calcul de ces différents coûts ont été fournies par le bureau d'études BETEM dans un tableur Excel. Ce fichier a été exploité par le CETHIL qui a formalisé ces règles de calcul dans un programme codé en langage C. Ce programme doit ensuite être intégré dans la PFM dont le cœur est piloté par des scripts en langage Python écrits par EDF R&D. Il sera alors possible d'optimiser la conception d'un projet de densification urbaine vis-à-vis de sa performance économique, grâce à l'algorithme NSGA-II de DEAP, écrit en langage Python et dont le couplage avec la PFM est réalisé par le CEA INES.

3.4 Pistes pour enrichir le dialogue avec les utilisateurs

Dans cette partie nous présentons des pistes de développement de notre méthode d'aide à la conception qui, d'après ce que nous avons vu dans la littérature et les tests réalisés au cours de cette thèse, nous paraissent intéressantes à explorer. Elles concernent en particulier l'amélioration du service rendu aux utilisateurs potentiels de l'outil ainsi que l'augmentation de leur implication dans la démarche d'optimisation.

3.4.1 Traitement automatique des résultats des optimisations

3.4.1. i) Implémentation d'un critère d'arrêt lié à l'hypervolume de la population courante

Avec la méthode de calcul de l'hypervolume que nous avons choisie et décrite dans [la partie 3.1.2. ii\) de ce chapitre](#), deux populations dont les « meilleurs » individus vis-à-vis de chacun des deux objectifs du problème ont des performances nettement distinctes auront un hypervolume bien différent, donc *a contrario* deux hypervolumes proches traduisent normalement des « valeurs extrêmes » (meilleure valeur pour chacun des deux objectifs) proches. Pour un utilisateur particulièrement intéressé par ces valeurs, on pourrait donc imaginer d'arrêter automatiquement le processus d'optimisation lorsque l'hypervolume de la population courante ne dépasserait pas un certain pourcentage de différence par rapport à l'hypervolume de la population précédente, et ce depuis un certain nombre de générations.

Dans le cas où l'optimisation réalisée concernerait un problème déjà traité précédemment avec les mêmes fonctions objectifs mais des variables différentes, il serait judicieux d'interdire à l'optimisation de s'arrêter avant d'avoir atteint le début du dernier palier de stagnation de l'hypervolume obtenu pour ces précédents tests. En effet, la valeur prise par l'hypervolume des populations produites par NSGA-II évolue généralement par paliers au fil des générations, comme on peut le voir sur la [figure](#)

IV.12 dans la partie 3.2.1. i) de ce chapitre. Cette précaution permettrait donc de diminuer le risque d'arrêter le processus d'optimisation alors que l'hypervolume a atteint un palier intermédiaire et pas le palier final.

3.4.1. ii) *Sélection d'individus selon les besoins des utilisateurs*

Nous avons vu dans les parties 3.2.1. i) (optimisation n°1) et 3.2.1. ii) (optimisation n°2) de ce chapitre que la sélection d'individus quasiment identiques à l'exception de la valeur d'une variable permet d'analyser la sensibilité des objectifs du problème aux variations de ce paramètre de conception. Pour un problème avec un faible nombre de variables et une taille de population réduite, cela peut se faire manuellement relativement rapidement. En revanche pour les problèmes de plus grande taille, pour lesquels l'optimisation multicritère par algorithme génétique est particulièrement intéressante, cette approche serait beaucoup trop chronophage. Un script Python pourrait donc inspecter le jeu de paramètres de tous les individus issus de chaque génération de l'optimisation et sélectionner pour l'utilisateur tous les individus ayant le même jeu de paramètres sauf pour une variable, choisie par l'utilisateur.

De la même façon, on pourrait récupérer parmi tous les individus issus de chaque génération ceux pour lesquels une certaine variable (ou plusieurs) ont une certaine valeur choisie par l'utilisateur. Cela permettrait par exemple au concepteur d'un projet de densification urbaine de chercher les solutions qui ont pris, pour une variable donnée, une valeur qui lui tient particulièrement à cœur et d'avoir des renseignements sur les valeurs à donner aux autres paramètres de conception s'il veut obtenir telle ou telle performance. On pourrait aussi donner l'opportunité à l'utilisateur de chercher si un certain individu (par exemple l'individu correspondant au projet initial) était contenu dans la population à l'issue d'une des générations et de connaître le cas échéant dans quelles générations suivantes on a retrouvé cet individu, pour voir comment NSGA-II a traité le jeu de paramètres correspondant à cet individu.

Pour aller plus loin dans ce type de démarche, il serait intéressant d'implémenter la possibilité d'imposer à l'algorithme d'optimisation de considérer comme population de la génération 0 un ensemble d'individus dont les paramètres ont été choisis par l'utilisateur, au lieu d'être des individus dont les paramètres ont été générés aléatoirement. On pourrait alors permettre à l'utilisateur de connaître le « parcours » réalisé par les individus de la population initiale au cours du processus d'optimisation, pour savoir par exemple lesquels sont conservés d'une génération à l'autre, et jusqu'à quelle génération cette conservation dure.

Nous avons formulé ces propositions comme étant des traitements *a posteriori* des résultats de l'optimisation, mais si l'utilisateur sait *a priori* quelles informations il souhaite obtenir sur ces résultats il serait pertinent de lui fournir ces renseignements à la fin de chaque génération. Cela lui permettrait de mettre fin au processus d'optimisation avant que le critère d'arrêt soit atteint s'il juge qu'il a déjà obtenu les informations qu'il cherchait.

3.4.2 Algorithme génétique interactif

Les algorithmes génétiques interactifs (AGI) sont des algorithmes génétiques qui ont été adaptés à une résolution interactive, c'est à dire à la prise en compte d'une évaluation humaine des solutions pour guider l'exploration de l'espace de recherche des solutions. Cette approche est intéressante pour intégrer dans les critères d'optimisation des fonctions objectifs qui ne sont pas formulables mathématiquement. Un architecte peut par exemple préférer un projet de construction d'un bâtiment à un autre pour des raisons esthétiques, ou pour des raisons de facilité de mise en œuvre liées à ses expériences de suivi de chantier, etc. De plus, l'utilisateur d'un AGI est directement confronté au fonctionnement de l'algorithme génétique dans lequel on lui demande d'intervenir, ce qui est un bon moyen pour lui faire comprendre ce fonctionnement [150].

Le premier AGI a été proposé par Dawkins dans son livre *The Blind Watchmaker* [151] publié en 1986, dans lequel il simule l'évolution de créatures (des *Biomorphs*) qui sont sélectionnées manuellement par un utilisateur. Smith a ensuite proposé une extension du travail de Dawkins [150] ainsi qu'une description claire des AGI et des contraintes liées à leur application. En particulier, il insiste sur le fait que les générations d'individus doivent être produites rapidement. En effet, un ordinateur peut être monopolisé par un problème pendant plusieurs jours mais un être humain va certainement perdre patience si on l'oblige à venir régulièrement donner son avis sur des solutions pendant une longue période. Smith ajoute que pour que l'AGI soit le plus utile possible au concepteur dont on requiert l'avis sur les individus créés, il faudrait que ce dernier puisse voir la population issue d'une génération quasiment instantanément après avoir donné son avis sur la population issue de la génération précédente.

Les AGI ont été utilisés pour des applications très variées. Par exemple, Ben Ismail *et al.* ont utilisé un AGI pour le problème classique de tournées de véhicules [152], qui consiste à définir les meilleures tournées (vis-à-vis du coût de livraison) d'une flotte de véhicules afin de fournir des biens ou des services en certains points. Dans l'exemple traité dans ces travaux, un AGI est utilisé pour résoudre un problème de tournées de véhicules avec 20 clients à livrer et 4 véhicules disponibles. L'utilisateur inspecte les solutions de la population courante et spécifie pour chacune d'elles les parties qu'il juge intéressantes (comme le montre la [figure IV.17](#)) ou inintéressantes.

Dans un tout autre registre, Baker et Seltzer ont utilisé un AGI pour résoudre un problème de conception de portraits de personnes [153]. Ceci peut par exemple être utilisé pour générer des portraits-robots d'un criminel en demandant l'assistance d'une victime ou personne témoin du crime pour sélectionner les portraits les plus ressemblants.

Dans le domaine de la conception de bâtiments, qui est celui qui nous intéresse plus particulièrement, Marin *et al.* ont développé l'outil EcoGen [103] que nous avons présenté dans [la partie 3.3 du chapitre I](#). EcoGen permet de résoudre des problèmes d'optimisation multiobjectif de la conception d'un ensemble de bâtiments inséré dans un quartier existant. Les variables du problème sont toutes liées à la morphologie de cet ensemble de bâtiments. La technique d'optimisation utilisée est un AGI développé dans le cadre du projet ANR EcCoGen (Eco-Conception Générative), qui allie les capacités des algorithmes génétiques avec celles des algorithmes de colonies de fourmis. L'architec-

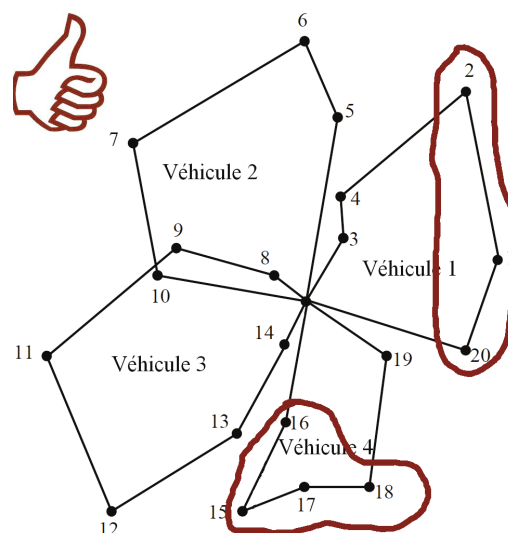


Figure IV.25 – Solution d'un problème de tournée de véhicules avec 20 clients à livrer et 4 véhicules disponibles, annotée par l'utilisateur - tirée de Ben Ismail et al., 2012.

ture de cet AGI, les briques qui le composent et des exemples de résultats qu'il permet d'obtenir sont présentés dans un article écrit par Marsault [154].

Notre méthode d'optimisation est loin du cas idéal pour l'utilisation d'un AGI, c'est à dire le passage quasi instantané d'une génération à une autre. Cependant, l'ajout d'un aspect interactif à l'algorithme génétique utilisé dans la PFM aurait tout de même un intérêt car la PFM sera tout d'abord une plateforme de recherche, utilisée par des concepteurs volontaires. De plus, les différentes méthodes de réduction du temps de calcul que nous avons présenté dans [la partie 2 de ce chapitre](#) pourraient permettre de diminuer considérablement les temps de chaque STD réalisée avec la PFM, et par conséquent de diminuer aussi le temps nécessaire pour passer d'une génération à une autre. Par ailleurs, proposer à des personnes non familiarisées avec les algorithmes évolutionnaires d'interagir avec la méthode d'optimisation serait un bon moyen de sensibilisation à la façon dont ces techniques peuvent aider à la conception de projets de densification urbaine.

Enfin, nous avons vu en analysant des résultats d'optimisation comme ceux de l'optimisation n°6 (présentée dans [la partie 3.2.2. ii\) de ce chapitre](#)) que face à l'ensemble de solutions quasi-optimales du front de Pareto final, l'utilisateur va choisir celles qu'il préfère selon son propre ressenti. Pour cette optimisation n°6, nous avons ainsi formulé des préférences pour les individus dont les pourcentages de surface vitrée sur les façades du bâtiment neuf sont les plus importants. Pour justifier ce choix nous avons mis en avant le meilleur confort visuel des occupants permis par l'augmentation de la taille des vitrages, sans que ce critère de confort ait été évalué par l'algorithme. Ces préférences que nous avons exprimées sont liées à nos expériences de vie dans des bâtiments plus ou moins vitrés. Si l'utilisateur finit de toute façon par choisir en fonction de son propre ressenti sur les solutions qui lui sont proposées, il est alors dommage de ne pas prendre en compte son avis au cours du processus d'optimisation, car des solutions qu'il n'acceptera jamais risquent d'être générées et évaluées en vain tout au long de ce processus.

4 Synthèse



La première partie de ce chapitre a été consacrée au traitement de la problématique de diminution des temps de calcul nécessaires pour réaliser des optimisations de la conception de projet de densification urbaine. Dans un premier temps, nous avons détaillé la méthode de réduction de la période de simulation que nous avons développée et appliquée à la STD d'une pièce de bureau pour illustrer son fonctionnement. Celui-ci repose sur l'enchaînement d'une étape de partitionnement de journées utilisant la technique du *k-means clustering*, d'une étape de construction de la séquence réduite et d'une évaluation finale des performances de cette réduction. Nous avons ensuite présenté la marche à gravir pour appliquer cette méthode à la STD de modèles numériques de projets de densification urbaine. D'autres techniques envisageables pour la diminution du temps de calcul ont été exposées pour conclure cette deuxième et dernière partie. Elles sont toutes en cours de développement et concernent aussi bien la réduction du nombre d'individus évalués que le lancement de STD ou d'optimisations complètes en parallèle. Les travaux de simplification de modèles en cours dans le projet MERUBBI viennent compléter ces efforts pour rendre la STD de bâtiments et *a fortiori* l'optimisation de leur conception plus rapides.

Le début de la deuxième partie de ce chapitre a été dédié à l'illustration des capacités d'une méthode d'optimisation couplant l'algorithme génétique NSGA-II et le logiciel EnergyPlus (E+) pour aider à la conception de projets de densification urbaine. Le choix des exemples traités a été guidé par une volonté d'exploration de possibilités d'optimisations qui ne sont pas prévues dans la version de la plateforme MERUBBI (PFM) en cours de développement. Il s'agit en particulier des possibilités de faire varier la taille des fenêtres et des protections solaires au cours du processus d'optimisation ainsi que de prendre en compte l'éclairage naturel pour moduler le recours à l'éclairage artificiel. Les résultats obtenus ont montré que la taille des fenêtres et des protections solaires du bâtiment neuf a un fort impact sur ses besoins énergétiques (optimisation n°4) mais que ces paramètres ont un impact négligeable sur le bilan énergétique de l'un des bâtiments existants les plus proches du bâtiment neuf (optimisation n°3).

Nous avons également constaté que malgré la complexité du modèle PinED utilisé dans ces 4 tests (prise en compte d'une réflexion CLO sur toutes les surfaces, bâtiment neuf avec une zone thermique par étage...) certaines solutions quasi-optimales aux yeux de l'algorithme génétique ne sont pas réalistes. Les optimisations n°5 et 6 ont permis de souligner le fort intérêt de la modulation de l'éclairage électrique utilisé en fonction de l'éclairage naturel reçu dans la pièce, ce qui permet d'inciter l'algorithme à sélectionner des solutions plus satisfaisantes en termes de ratios de surfaces vitrées sur les façades du bâtiment neuf les plus proches des deux points de référence choisis. Néanmoins, l'impossibilité de placer plus de deux points de référence par étage est trop limitante pour permettre d'optimiser la conception de l'ensemble du bâtiment de façon vraiment cohérente par rapport aux objectifs fixés. Ceci pourrait être résolu en découpant chaque étage en plusieurs zones thermiques car on pourrait alors placer des points de référence à proximité de chaque façade. Cependant, ce niveau de détail n'est ici pas adapté au niveau d'analyse, qui se place en phase amont du processus de conception dans laquelle l'aménagement intérieur des locaux n'est pas connu.

Ces réflexions mettent en exergue que l'optimisation multicritère de la conception d'un projet de densification urbaine n'est pas miraculeuse et qu'elle peut en premier lieu souligner les points faibles du modèle utilisé pour la STD des bâtiments. Des allers-retours sont donc nécessaires entre le concepteur et la méthode d'optimisation pour affiner le modèle en fonction des critères du problème à résoudre. Si le modèle ne peut pas être enrichi davantage, il est aussi possible d'adapter les paramètres de l'optimisation. Dans notre exemple, pour garantir un certain confort visuel à chaque étage on pourrait modifier la plage de variation du pourcentage de surface vitrée sur chaque façade pour interdire la sélection de valeurs trop faibles.

Nous sommes ensuite revenu sur les capacités de la future PFM en termes d'optimisation de la conception de projets de densification urbaine. Elles sont complémentaires de celles de la méthode reposant sur E+ au niveau des variables autorisées. La future PFM est cependant plus riche en termes de diversité des couples de performances éligibles pour l'optimisation bi-objectif, grâce à ses modules d'évaluations énergétique, bioclimatique et économique.

La seconde partie de ce chapitre se termine sur l'énumération non exhaustive de pistes de développement pour augmenter à la fois le niveau d'interaction des concepteurs de bâtiments avec la méthode d'optimisation et le niveau de services rendus à ces utilisateurs potentiels. Cela s'applique aussi bien à la méthode couplant NSGA-II et E+ qu'à celle implémentée dans la PFM. Nous avons ainsi proposé d'automatiser le traitement des résultats des optimisations en fonction des attentes des utilisateurs. Une voie de recherche prometteuse a également été présentée, elle consiste à développer un algorithme génétique interactif et à l'intégrer dans la PFM pour impliquer davantage les concepteurs de projets de densification urbaine dans le processus d'optimisation.

Conclusions

Au cours de l'introduction de cette thèse, nous avons expliqué qu'il y a actuellement un besoin d'outils capables d'assister les concepteurs de projets de densification urbaine. Il semble en effet urgent d'étudier les possibilités d'intégration de bâtiments dans des espaces urbains appropriés¹, afin de réduire les effets destructeurs de l'urbanisation expansive.

Dans le premier chapitre de cette thèse nous avons montré l'intérêt de l'optimisation multicritère par algorithme génétique pour aider à la conception de projets de densification urbaine, en insistant sur l'algorithme génétique NSGA-II qui est particulièrement populaire. Nous avons ensuite souligné les caractéristiques partagées par les outils d'optimisation à l'échelle urbaine, récemment apparus. Aucun d'entre eux ne permet d'optimiser le projet étudié vis-à-vis de critères de performances bioclimatiques, ni économiques. De plus, malgré le fait que les travaux repérés dans la littérature se positionnent à une échelle urbaine, la plupart d'entre eux visent à optimiser la conception d'un ensemble de bâtiments placé en site dégagé. Dans de tels cas, l'impact de l'intégration de ces bâtiments sur un éventuel environnement urbain existant n'est pas du tout évalué.

Le deuxième chapitre nous a permis de préciser les besoins des utilisateurs potentiels d'un outil d'aide à la conception des projets d'implantation de nouveaux bâtiments dans des îlots urbains existants. Nous avons ensuite estimé dans quelle mesure les logiciels de simulation thermique dynamique (STD) EnergyPlus (E+) et Pleiades+COMFIE (P+C) sont capables d'apporter des réponses pertinentes à ces besoins. Il s'avère que ces deux outils s'en sortent bien, surtout E+ qui permet de prendre en compte une réflexion solaire sur le sol, les parois des bâtiments et les protections solaires. Nous avons aussi montré dans ce chapitre qu'E+ peut être couplé à NSGA-II pour optimiser la conception de projets de densification urbaine. Néanmoins, par rapport à la plateforme MERUBBI (PFM) présentée à la fin de ce deuxième chapitre, E+ et *a fortiori* P+C sont limités par leurs capacités de modélisation des réflexions solaires et des échanges GLO entre les parois des bâtiments.

Le troisième chapitre s'est donc ouvert sur la description de la PFM, qui au terme de son développement sera capable d'évaluer des projets de densification urbaine en prenant en compte plusieurs inter-réflexions solaires ainsi que les échanges GLO entre toutes les surfaces de la scène urbaine. La suite du chapitre a été dédiée à la comparaison des résultats obtenus avec E+, P+C et la PFM en termes de besoins énergétiques annuels des différentes composantes d'un projet de densification urbaine. Différentes versions ont été considérées pour tenir compte des capacités inégales des trois outils pour le calcul de réflexions CLO. L'analyse des résultats obtenus a mis en évidence qu'il est important de ne pas trop simplifier la modélisation du parcours du rayonnement solaire dans le quartier pour bien évaluer les interactions entre le bâtiment neuf et les bâtiments existants. Par ailleurs, cette étude comparative a montré que l'outil développé dans le projet MERUBBI est fiable.

1. Il ne s'agit donc pas de densifier à n'importe quel prix en allant construire de nouveaux bâtiments sur des espaces verts ou des terres agricoles qui ont pu être préservés.

Dans ce manuscrit, nous avons expliqué que pour assister efficacement les concepteurs de projets de densification urbaine il faut un outil capable d'effectuer des STD annuelles de tous les bâtiments d'un îlot urbain en un temps aussi court que possible. Or, le troisième chapitre montre qu'une telle simulation avec E+, et à plus forte raison avec la version actuelle de la PFM, est longue. Dans le quatrième chapitre nous avons donc présenté des techniques de diminution des temps de calcul, en détaillant le fonctionnement d'une méthode de réduction de la période de simulation que nous avons développée. Nous avons ensuite appliqué notre méthode d'optimisation associant E+ et NSGA-II à la conception d'un projet d'intégration d'un bâtiment neuf au sein d'un îlot urbain à forte densité. Différents tests ont été réalisés en changeant les variables ou les fonctions objectifs du problème. Les résultats de ces optimisations ont montré qu'E+ est un outil pertinent pour la démarche d'aide à la conception qui nous anime. D'un autre côté, les nombreux critères (énergétiques, bioclimatiques et économiques) qui peuvent être évalués par la PFM et ses capacités de calcul de plusieurs inter-réflexions CLO et des échanges GLO entre les parois des bâtiments en font un outil tout aussi intéressant.

Enfin, il nous semble important de ne pas perdre de vue qu'une méthode d'aide à la conception de projets de densification urbaine par algorithme génétique, aussi rapide soit-elle, restera toujours un outil d'assistance des concepteurs qui n'a pas vocation à les remplacer. Nous avons donc souligné dans ce quatrième chapitre qu'il existe dans toute opération d'optimisation des aspects qu'on ne sait pas optimiser et qui sont liés aux connaissances et au ressenti de l'utilisateur. Cet utilisateur va ainsi choisir de manière subjective les solutions qu'il préfère parmi le front de Pareto de la population finale obtenue à la fin d'une optimisation, ou exprimer un avis subjectif sur certaines solutions au cours du processus d'optimisation, comme c'est le cas dans les algorithmes génétiques interactifs.

Perspectives

Les travaux de thèse décrits dans ce manuscrit ouvrent la voie à de nombreuses perspectives de recherche. Nous pensons tout d'abord à l'exploitation de toutes les possibilités offertes par la méthode d'optimisation développée, par exemple en la faisant tester par différents concepteurs de projets de densification urbaine. Ceci permettrait de montrer l'intérêt de la méthode sur de nombreux cas d'étude différents et d'affiner ses caractéristiques en fonction des retours de ces utilisateurs. Nous avons montré au cours de cette thèse que les flux solaires sont des flux énergétiques prépondérants à l'interface bâtiment-environnement. Or, la morphologie d'un bâtiment neuf qui va être implanté au sein d'un îlot urbain existant va avoir une forte influence sur ces flux solaires. Il faudrait donc aussi étudier les possibilités d'optimisation morphologique de la conception de ce bâtiment. Comme nous l'avons vu dans cette thèse, cela placerait la réflexion plus en amont et complexifierait l'évaluation de certains critères tels que le coût de construction. Un autre point que nous n'avons pas abordé, et qui mériterait d'être étudié en profondeur, est la prise en compte de l'influence de la conception d'un bâtiment neuf sur les systèmes énergétiques dont sont équipés les bâtiments existants. Nous pensons en premier lieu à des systèmes de production d'énergie solaire dont l'efficacité pourrait être impactée non seulement par les ombres portées par le nouveau bâtiment, mais aussi par les réflexions solaires sur les parois de ce dernier, voire par les échanges infrarouges entre ces parois et le système énergétique.

Par ailleurs, nous avons esquissé de nombreuses pistes à explorer pour réduire les temps nécessaires à la simulation thermique dynamique de projets de densification urbaine. Certaines d'entre elles vont être traitées par EDF R&D ou ont déjà commencé à l'être. C'est le cas de la simplification des modèles Modelica les plus complexes (bâtiment neuf entouré des bâtiments existants) *via* l'agrégation de parois opaques ou vitrées et la linéarisation puis réduction des modèles. La diminution du temps de calcul des échanges radiatifs GLO entre bâtiments est aussi en cours d'étude, sous diverses formes. Dans la même optique, l'utilisation du module de calcul de la zone d'impact d'un bâtiment sur ses voisins - développé au cours du projet MERUBBI - mériterait d'être approfondie pour éviter de simuler des bâtiments existants dont le niveau d'interactions avec le bâtiment neuf est négligeable.

La méthode de réduction de la période de simulation que nous avons proposée doit également être développée. Elle a prouvé son efficacité sur un cas très simple. Cependant, son utilisation pour réduire les temps de calcul de l'optimisation de la conception de projets de densification urbaine pose de nombreuses questions. Il faut en effet vérifier que cette méthode fonctionne aussi bien sur des modèles de quartiers que sur le bâtiment monozone testé dans cette thèse. Il est aussi nécessaire de déterminer si l'utilisation d'une grandeur pour construire la séquence réduite permet de retrouver de façon satisfaisante d'autres grandeurs qui intéressent les concepteurs. Comme l'objectif est d'utiliser cette période réduite pour les STD effectuées lors d'optimisations de critères énergétiques, bioclimatiques ou économiques, il y a beaucoup de risques que cela ne soit pas le

cas pour certains ensembles de grandeurs. Cet écueil pourrait être surmonté par le développement d'une technique de construction de la séquence réduite qui soit multiobjectif. L'adéquation de la méthode développée avec d'autres outils de STD que le logiciel EnergyPlus reste aussi à valider. A la lumière de ces éléments, la mise au point d'une méthode de réduction de la période de simulation qui soit générique et robuste pour tous les problèmes (donc différents modèles de quartier, différents objectifs, différentes variables) d'optimisation de projets de densification urbaine que l'on souhaite pouvoir traiter pourrait faire l'objet d'une nouvelle thèse.

Le traitement de problèmes d'optimisation est parfois précédé d'études de sensibilité des objectifs aux paramètres des modèles. L'étendue des sujets à aborder dans ces travaux de thèse nous a obligé à faire des choix, et nous avons préféré ne pas aborder le domaine des analyses de sensibilité. Néanmoins, l'intégration d'une telle approche dans un outil comme la plateforme MERUBBI enrichirait la démarche d'aide à la conception. En effet, cela permettrait d'informer les concepteurs de projets de densification urbaine sur les impacts des paramètres qu'ils souhaitent faire varier sur les critères qu'ils souhaitent optimiser, et ce en amont du processus d'optimisation multicritère. Ceci pourrait alors amener ces personnes à réduire le nombre de variables du problème en conservant seulement les plus pertinentes, ce qui réduirait les temps de calcul et améliorerait la lisibilité des résultats de l'optimisation.

Enfin, le remplacement de l'algorithme NSGA-II par un algorithme génétique interactif dans notre méthode d'aide à la conception de projets de densification urbaine est une perspective enthousiasmante. En effet, les concepteurs d'un projet d'implantation d'un bâtiment neuf dans un îlot urbain existant vont évaluer les solutions qui leur sont proposées avec leur personnalité et leur expérience professionnelle. Les critères que chacun d'eux va utiliser pour juger telle ou telle variante du projet ne sont donc pas tous formalisables mathématiquement. On gagnerait alors à consulter ces créateurs au cours du processus d'optimisation pour que l'ensemble de solutions qui leur est finalement proposé soit plus proche de leurs attentes. Une telle démarche a de l'avenir, car on peut raisonnablement penser que « le rapport au senti, au vécu, à l'immatériel et au subtil restera longtemps hors de portée des logiciels »¹.

1. Page 11, Marcel Ruchon, architecte, cité dans l'article de Xavier Marsault et Hervé Lequay : *Éco-conception pré-architecturale générative : jusqu'où peut-on aller ? Enjeux, possibilités, méthodes. Séminaire de Conception Architecturale Numérique*, septembre 2016, Toulouse, France.

Bibliographie

- [1] United Nations - Department of Economic and Social Affairs - POPULATION DIVISION : *World Urbanization Prospects : The 2014 Revision*. Highlights. United Nations, 2014, 27 p.
- [2] Angel SHLOMO, Jason PARENT, Daniel L. CIVCO *et al.* : The dimensions of global urban expansion : Estimates and projections for all countries, 2000–2050. *Progress in Planning*, vol. 75, pp. 53–107, 2011.
- [3] Bhatta BASUDEB : *Causes and Consequences of Urban Growth and Sprawl*. In : *Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data*. Advances in Geographic Information Science, 2010, 172 p.
- [4] Philippe POINTEREAU et Frédéric COULON : Abandon et artificialisation des terres agricoles. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, numéro 57, pp. 109–120, 2009.
- [5] AGRESTE : Utilisation du territoire. L'artificialisation des terres de 2006 à 2014 : pour deux tiers sur des espaces agricoles. *Primeur*, numéro 326, pp. 1–6, 2015.
- [6] Bruno PEUPOORTIER : *Énergétique des bâtiments et simulation thermique*. Eyrolles, 2016, 446 p.
- [7] Marion BONHOMME : *Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine*. Thèse de doctorat, Génie Civil. Toulouse : Université de Toulouse, 2013.
- [8] Maria KOLOKOTRONI, X. REN, Michael DAVIES *et al.* : London's urban heat island : Impact on current and future energy consumption in office buildings. *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 302–311, 2012.
- [9] Clara S. GOOD, Gabriele LOBACCARO et Siri HÅRKLAU : Optimization of solar energy potential for buildings in urban areas—a norwegian case study. *Energy procedia*, vol. 58, pp. 166–171, 2014.
- [10] Lou CHESNÉ : *Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques*. Thèse de doctorat, Énergétique. Lyon : INSA de Lyon, 2012.
- [11] Alain BERRO : *Optimisation multiobjectifs et stratégies d'évolution en environnement dynamique*. Thèse de doctorat, Informatique. Toulouse : Université des Sciences Sociales Toulouse 1, 2001.
- [12] Tito HOMEM-DE-MELLO et Güzin BAYRAKSAN : Monte Carlo sampling-based methods for stochastic optimization. *Surveys in Operations Research and Management Science*, vol. 19, n° 1, pp. 56–85, 2014.
- [13] Patrick SIARRY : *Métaheuristiques*. Eyrolles, 2014, 516 p.
- [14] Philippe MARIN : *Exploration des mécanismes évolutionnaires appliqués à la conception architecturale : mise en œuvre d'un algorithme génétique guidé par les qualités solaires passives de l'enveloppe*. Thèse de doctorat, Sciences de l'architecture. Nancy : INPL, 2010.

- [15] Thibaut VERMEULEN : *Optimisation de formes urbaines soumises au rayonnement solaire*. Thèse de doctorat, Physique urbaine. Compiègne : UTC, 2014.
- [16] John H. HOLLAND : *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. The MIT Press, 1975, 232 p.
- [17] David E. GOLBERG : *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley, 1989, 412 p.
- [18] Lawrence J. FOGEL, Alvin J. OWENS et Michael J. WALSH : *Artificial intelligence through simulated evolution*. John Wiley & Sons, 1966.
- [19] Ingo RECHENBERG : *Cybernetic solution path of an experimental problem*. Technical Report Library Translation No. 1122. Farnborough : Royal Aircraft Establishment, 1965.
- [20] John R. KOZA : *Genetic Programming, on the programming of computers by means of natural selection*. The MIT Press, 1992, 836 p.
- [21] Muhammad W. AHMAD, Monjur MOURSHED, Baris YUCE *et al.* : Computational intelligence techniques for hvac systems : A review. *Building Simulation*, vol. 9, n° 4, pp. 359–398, 2016.
- [22] Abbas EL DOR : *Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d'images et en électronique*. Thèse de doctorat, Informatique. Marne-la-Vallée : Université Paris-Est, 2012.
- [23] Philippe MARIN : *Eco Conception Générative*. Rapport final et livrables - Programme ANR-10-Création-012. Paris : Agence Nationale de la Recherche, 2013, 225 p.
- [24] Rainer STORN et Kenneth PRICE : Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, vol. 11, n° 4, pp. 341–359, 1997.
- [25] Heinz MÜHLENBEIN et Gerhard PAASS : From recombination of genes to the estimation of distributions I. Binary parameters. *In : Proceedings of the 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, pages 178–187, September 1996, Berlin, Germany.
- [26] Charles R. DARWIN : *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. John Murray, 1859, 502 p.
- [27] Harold WATERKEYN : Partionnement de territoire à l'aide d'un algorithme génétique. Mémoire de Master, Sciences Informatiques. Bruxelles : ULB, 2013.
- [28] Vilfredo PARETO : *Cours d'économie politique*. Tomes 1 et 2. F. Rouge, 1896, 430 et 426 p.
- [29] Mathieu RIVALLAIN : *Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants*. Thèse de doctorat, Sciences de l'Ingénieur. Marne-la-Vallée : Université Paris-Est, 2013.
- [30] J. David SCHAFFER : Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. *In : Proceedings of the 1st international Conference on Genetic Algorithms*, pages 93–100, July 1985, Pittsburgh, PA, USA.
- [31] Denis BOUYSSOU, Didier DUBOIS, Marc PIRLOT *et al.* : *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 1 : outils de modélisation*. Lavoisier, 2006, 394 p.

- [32] Anh-Tuan NGUYEN, Sigrid REITER et Philippe RIGO : A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113 :1043–1058, 2014.
- [33] Vasileios MACHAIRAS, Aris TSANGRASSOULIS et Kleo AXARLI : Algorithms for optimization of building design : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 101–112, 2014.
- [34] Luisa G. CALDAS et Leslie K. NORFORD : Genetic algorithms for optimization of building envelopes and the design and control of hvac systems. *Journal of solar energy engineering*, vol. 125, n° 3, pp. 343–351, 2003.
- [35] Fanny Pernodet CHANTRELLE, Hicham LAHMIDI, Werner KEILHOLZ *et al.* : Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. *Applied Energy*, vol. 88, n° 4, pp. 1386–1394, 2011.
- [36] Yuehong LU, Shengwei WANG, Yang ZHAO *et al.* : Renewable energy system optimization of low/zero energy buildings using single-objective and multi-objective optimization methods. *Energy and Buildings*, vol. 89, pp. 61–75, 2015.
- [37] Sanja STEVANOVIĆ : Optimization of passive solar design strategies : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 177–196, 2013.
- [38] Rajkumar ROY, Srichand HINDUJA et Roberto TETI : Recent advances in engineering design optimisation : Challenges and future trends. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 57, n° 2, pp. 697–715, 2008.
- [39] Ralph EVINS : Configuration of a genetic algorithm for multi-objective optimisation of solar gain to buildings. In : *Proceedings of the 12th annual genetic and evolutionary computation conference*, pages 2003–2006, July 2010, Portland, Or., USA.
- [40] Ralph EVINS : A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 230–245, 2013.
- [41] John S. GERO, Neville D. CRUZ et Antony D. RADFORD : Energy in context : a multicriteria model for building design. *Building and Environment*, vol. 18, n° 3, pp. 99–107, 1983.
- [42] Mathieu THOREL : *Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale*. Thèse de doctorat, Génie Civil et Sciences de l'Habitat. Grenoble : Université de Grenoble, 2014.
- [43] Kalyanmoy DEB, Amrit PRATAP, Sameer AGARWAL *et al.* : A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 6, n° 2, pp. 182–197, 2002.
- [44] Nidamarthi SRINIVAS et Kalyanmoy DEB : Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, vol. 2, n° 3, pp. 221–248, 1994.
- [45] Eckart ZITZLER, Kalyanmoy DEB et Lothar THIELE : Comparison of multiobjective evolutionary algorithms : Empirical results. *Evolutionary computation*, vol. 8, n° 2, pp. 173–195, 2000.

- [46] Rodolphe LE RICHE, Marc SCHOENAUER et Michèle SEBAG : Un état des lieux de l'optimisation évolutionnaire et de ses implications en sciences pour l'ingénieur. In P. BREITKOPF et C. KNOPF-LENOIR, éditeurs : *Modélisation numérique. 2, Défis et perspectives. Traité MIM, série Méthodes numériques et éléments finis*, pages 187–259. Hermès, 2007.
- [47] Thierry DUFORESTEL : *Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique : recherches sur l'efficacité énergétique des bâtiments*. Habilitation à diriger des recherches. Lyon : Université Claude Bernard Lyon 1, 2015.
- [48] Herbert A. JACOBS et Katherine JACOBS : *Building with Frank Lloyd Wright : an illustrated memoir*. SIU Press, 1978, 147 p.
- [49] Félix TROMBE, Jacques F. ROBERT, M. CABANOT *et al.* : Concrete walls to collect and hold heat. *Solar Age*, vol. 2, n° 8, pp. 13–19, 1977.
- [50] Omidreza SAADATIAN, Kamaruzzaman SOPIAN, Chin Haw LIM *et al.* : Trombe walls : a review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n° 8, pp. 6340–6351, 2012.
- [51] Xavier LONCOUR, Arnaud DENEYER, Marcelo BLASCO *et al.* : *Ventilated Double Façades—Classification & illustration of façade concepts*. Technical Report. Bruxelles : Belgian Building Research Institute, 2004, 49 p.
- [52] Thierry DUFORESTEL, Hassan BOUIA, Lou CHESNÉ *et al.* : *Projet HABISOL-VALERIE, Valorisation par l'enveloppe du bâtiment des ressources énergétiques immédiatement exploitables*. Rapport final. Paris : Agence Nationale de la Recherche, 2012, 177 p.
- [53] Lou CHESNÉ, Thierry DUFORESTEL, Jean-Jacques ROUX *et al.* : Energy saving and environmental resources potentials : Toward new methods of building design. *Building and Environment*, vol. 58, pp. 199–207, 2012.
- [54] Pierre TITTELEIN : *Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation*. Thèse de doctorat, Génie Civil et Sciences de l'Habitat. Le Bourget-du-Lac : Université de Savoie, 2008.
- [55] Marco MANZAN : Genetic optimization of external fixed shading devices. *Energy and Buildings*, vol. 72, pp. 431–440, 2014.
- [56] Sylvain HOUPERT : *Approche inverse pour la résolution des contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain, développement et application du logiciel SVR*. Thèse de doctorat, Architecture. Nantes : Université de Nantes, 2003.
- [57] Jonathan A. WRIGHT, Alexander BROWNLEE, Monjur M. MOURSHED *et al.* : Multi-objective optimization of cellular fenestration by an evolutionary algorithm. *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 7, n° 1, pp. 33–51, 2014.
- [58] Luisa G. CALDAS et Leslie K. NORFORD : A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in construction*, vol. 11, n° 2, pp. 173–184, 2002.
- [59] Charalampos KASINALIS, Roel C.G.M. LOONEN, Daniel CÓSTOLA *et al.* : Framework for assessing the performance potential of seasonally adaptable facades using multi-objective optimization. *Energy and Buildings*, vol. 79, pp. 106–113, 2014.

- [60] Tarek RAKHA et Khaled NASSAR : Genetic algorithms for ceiling form optimization in response to daylight levels. *Renewable Energy*, vol. 36, n° 9, pp. 2348–2356, 2011.
- [61] Michela TURRIN, Peter von BUELOW et Rudi STOUFFS : Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 25, n° 4, pp. 656–675, 2011.
- [62] Mariusz ADAMSKI : Optimization of the form of a building on an oval base. *Building and Environment*, vol. 42, n° 4, pp. 1632–1643, 2007.
- [63] Wojciech MARKS : Multicriteria optimisation of shape of energy-saving buildings. *Building and Environment*, vol. 32, n° 4, pp. 331–339, 1997.
- [64] Yun Kyu YI et Ali M. MALKAWI : Optimizing building form for energy performance based on hierarchical geometry relation. *Automation in Construction*, vol. 18, n° 6, pp. 825–833, 2009.
- [65] Daniel TUHUS-DUBROW et Moncef KRARTI : Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*, vol. 45, n° 7, pp. 1574–1581, 2010.
- [66] Alexander E.I. BROWNLEE et Jonathan A. WRIGHT : Constrained, mixed-integer and multi-objective optimisation of building designs by NSGA-II with fitness approximation. *Applied Soft Computing*, vol. 33, pp. 114–126, 2015.
- [67] Essia ZNOUDA, Nadia GHRAB-MORCOS et Atidel HADJ-ALOUANE : Optimization of mediterranean building design using genetic algorithms. *Energy and Buildings*, vol. 39, n° 2, pp. 148–153, 2007.
- [68] Nick BAKER et Koen STEEMERS : *The LT method 2.0 : an energy design tool for non-domestic buildings*. Cambridge Architectural Research Ltd., 1995, 81 p.
- [69] Ralph L. KNOWLES : *Energy and form : an ecological approach to urban growth*. The MIT Press, 1974, 198 p.
- [70] Ralph L. KNOWLES et Richard D. BERRY : *Solar envelope concepts : moderate density building applications*. Final Report. Los Angeles : University of Southern California, 1980, 135 p.
- [71] Ralph L. KNOWLES : The solar envelope : its meaning for energy and buildings. *Energy and Buildings*, vol. 35, n° 1, pp. 15–25, 2003.
- [72] Isaac G. CAPELUTO et Edna SHAVIV : Modeling the design of urban fabric with solar rights considerations. *In : Proceedings of the ISES 1997 Solar World Congress*, pages 148–160, August 1997, Teajon, Korea.
- [73] Isaac G. CAPELUTO et Edna SHAVIV : On the use of ‘solar volume’ for determining the urban fabric. *Solar Energy*, vol. 70, n° 3, pp. 275–280, 2001.
- [74] John F. COTTON : Solid modeling as a tool for constructing solar envelopes. *Automation in construction*, vol. 5, n° 3, pp. 185–192, 1996.
- [75] Daniel SIRET : Les enveloppes solaires de Ralph Knowles, ou les ambivalences d’un modèle de régulation des formes urbaines. *Lieux Communs, Cahiers du LAUA*, n° 14, pp. 195–206, 2011.

- [76] Carlo RATTI et Eugenio MORELLO : Sun scapes : extending the ‘solar envelopes’ concept through ‘iso-solar surfaces’. *In : The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, November 2005, Beirut, Lebanon.
- [77] Sara FREITAS, Cristina CATITA, Paula REDWEIK *et al.* : Modelling solar potential in the urban environment : State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 915–931, 2015.
- [78] Cristina M. CATITA, Paula REDWEIK, J. PEREIRA et Miguel C. BRITO : Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades. *Computers & Geosciences*, vol. 66, pp. 1–12, 2014.
- [79] Adrien GROS, Emmanuel BOZONNET, Christian INARD *et al.* : Simulation tools to assess microclimate and building energy – A case study on the design of a new district. *Energy and Buildings*, vol. 114, pp. 112–122, 2016.
- [80] Emmanuel BOZONNET : *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon*. Thèse de doctorat, Génie Civil. La Rochelle : Université de la Rochelle, 2005.
- [81] Drury B. CRAWLEY, Curtis O. PEDERSEN, Linda K. LAWRIE *et al.* : Energyplus : energy simulation program. *ASHRAE journal*, vol. 42, n° 4, pp. 49–56, 2000.
- [82] Alstan J. JAKUBIEC et Christoph F. REINHART : Diva-for-rhino 2.0 : environmental parametric modeling in rhinoceros/grasshopper using radiance, daysim and energyplus. *In : Building Simulation Conference 2011*, November 2011, Sydney, Australia.
- [83] Christoph F. REINHART, Timur DOGAN, J. Alstan JAKUBIEC *et al.* : Umi - an urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability. *In : Building Simulation Conference 2013*, August 2013, Chambéry, France.
- [84] David JOSEPH, Delfin BRAGA, Jean-Patrick ROCCIA *et al.* : Calcul des flux solaires pour le bâtiment par méthode de ray-tracing. *In : Congrès annuel de la Société Française de Thermique*, mai 2011, Perpignan, France.
- [85] Noémie GAUTHIER : *Analyses morphologiques de formes urbaines et Etude de l'impact des formes urbaines sur les gains énergétiques solaires*. Rapport de Projet de Fin d'Etudes. Strasbourg : INSA de Strasbourg, 2014, 53 p.
- [86] Johannes ASCHABER, Marion HILLER et Robert WEBER : Trnsys17 : new features of the multizone building model. *In : Proceedings of the Building Simulation Conference 2009*, pages 1983–1988, July 2009, Glasgow, Scotland.
- [87] Joseph A. CLARK : The ESP system : towards a new generation of building energy analysis program. *In : Proceedings of the Building Simulation Conference 1985*, pages 215–227, August 1985, Seattle, Wa., USA.
- [88] Jean-Jacques ROUX : *Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiment*. Thèse de doctorat, Génie Civil. Lyon : INSA de Lyon, 1984.
- [89] Mansour NIKPOUR, Mohd Z. KANDAR et Elaheh MOUSAVI : Empirical validation of simulation software with experimental measurement of self shading room in term of heat gain. *World Applied Sciences Journal*, vol. 21, n° 8, pp. 1200–1206, 2013.

- [90] Gilles PLESSIS, Aurélie KAEMMERLEN et Amy LINDSAY : Buildsyspro : a Modelica library for modelling buildings and energy systems. *In : Proceedings of the 10th International Modelica Conference*, pages 1161–1169, March 2014, Lund, Sweden.
- [91] Bruno PEUPORTIER et Isabelle Blanc SOMMEREUX : Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings. *International Journal of Solar Energy*, vol. 8, n° 2, pp. 109–120, 1990.
- [92] Clément RIBAULT : *Quel modèle de développement pour les éco-quartiers ? Contribution à l'élaboration d'une méthodologie d'aide à la conception des projets d'aménagement via un outil de simulation thermique dynamique multizone*. Rapport de Projet de Fin d'Etudes. Strasbourg : INSA de Strasbourg, 2014, 55 p.
- [93] Benjamin MORILLE, Nicolas LAUZET et Marjorie MUSY : Solene-microclimate : A tool to evaluate envelopes efficiency on energy consumption at district scale. *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1165–1170, 2015.
- [94] Khaled ATHAMENA : *Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers*. Thèse de doctorat, Architecture. Nantes : Université de Nantes, 2012.
- [95] Julien BOUYER, Christian INARD et Marjorie MUSY : Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 7, pp. 1549–1559, 2011.
- [96] Ferdinando SALATA, Iacopo GOLASI, Roberto de LIETO VOLLARO *et al.* : Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society*, vol. 26, pp. 318–343, 2016.
- [97] Adrien GROS, Emmanuel BOZONNET et Christian INARD : Cool materials impact at district scale – Coupling building energy and microclimate models. *Sustainable Cities and Society*, vol. 13, pp. 254–266, 2014.
- [98] Yasin TOPARLAR, Bert BLOCKEN, P. VOS *et al.* : CFD simulation and validation of urban microclimate : A case study for Bergpolder Zuid, rotterdam. *Building and environment*, vol. 83, pp. 79–90, 2015.
- [99] Jakob STRØMANN-ANDERSEN et Peter A. SATTRUP : The urban canyon and building energy use : Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 8, pp. 2011–2020, 2011.
- [100] Anna L. PISELLO, John E. TAYLOR, Xiaoqi XU *et al.* : Inter-building effect : Simulating the impact of a network of buildings on the accuracy of building energy performance predictions. *Building and Environment*, vol. 58, pp. 37–45, 2012.
- [101] Aristotelis VARTHOLOMAIOS : The residential solar block envelope : A method for enabling the development of compact urban blocks with high passive solar potential. *Energy and Buildings*, vol. 99, pp. 303–312, 2015.
- [102] Lucie MERLIER : *On the interactions between urban structures and air flows : A numerical study of the effects of urban morphology on the building wind environment and the related building energy loads*. Thèse de doctorat, Génie Civil. Lyon : INSA de Lyon, 2015.

- [103] Philippe MARIN, Xavier MARSAULT, Lazaros E. MAVROMATIDIS *et al.* : EC-CO-GEN : an evolutionary simulation assisted design tool for energy rating of buildings in early design stage to optimize the building form. *In : Building Simulation Conference 2013*, August 2013, Chambéry, France.
- [104] Laëtitia ARANTES : *L'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située*. Thèse de doctorat, Matériaux, mécanique, génie civil, électrochimie. Grenoble : Université de Grenoble, 2012.
- [105] Angela VINCENTI, Mohammad R. AHMADIAN et Paolo VANNUCCI : Bianca : a genetic algorithm to solve hard combinatorial optimisation problems in engineering. *Journal of Global Optimization*, vol. 48, n° 3, pp. 399–421, 2010.
- [106] Marta J.N. OLIVEIRA PANÃO, Helder J.P. GONÇALVES *et al.* : Optimization of the urban building efficiency potential for mid-latitude climates using a genetic algorithm approach. *Renewable Energy*, vol. 33, n° 5, pp. 887–896, 2008.
- [107] Carlos A. CONCEIÇÃO ANTÓNIO, João B. MONTEIRO et Clito F. AFONSO : Optimal topology of urban buildings for maximization of annual solar irradiation availability using a genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, n° 1, pp. 424–437, 2014.
- [108] Benjamin DILLENBURGER, Markus BRAACH et Ludger HOVESTADT : Building design as individual compromise between qualities and costs : A general approach for automated building generation under permanent cost and quality control. *Joining Languages, Cultures and Visions : CAAD Futures 2009*, pp. 459–571, 2009.
- [109] Jérôme H. KÄMPF et Darren ROBINSON : Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms. *Energy and Buildings*, vol. 42, n° 6, pp. 807–814, 2010.
- [110] Jérôme H. KÄMPF et Darren ROBINSON : A hybrid cma-es and hde optimisation algorithm with application to solar energy potential. *Applied Soft Computing*, vol. 9, n° 2, pp. 738–745, 2009.
- [111] Tomás Méndez ECHENAGUCIA, Alfonso CAPOZZOLI, Ylenia CASCONI *et al.* : The early design stage of a building envelope : Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. *Applied Energy*, vol. 154, pp. 577–591, 2015.
- [112] Frédéric CHERQUI : *Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier - Méthode ADEQUA*. Thèse de doctorat, Génie Civil. La Rochelle : Université de la Rochelle, 2005.
- [113] Club des chargés d'aménagement de la DDT de L'ISÈRE : *Comment favoriser la densification ?* Note. Grenoble : Direction départementale des territoires de l'Isère, 2015, 29 p.
- [114] Bruno PEUPORTIER : *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*. Les Presses MINES ParisTech, 2008, 336 p.
- [115] Guillaume LAMÉ et Yann LEROY : Ecoconception des bâtiments : pratiques actuelles et freins à l'utilisation des outils d'écoconception - Une étude en France. *In : 14e colloque AIP PRIMECA*, mars 2015, Aimé La Plagne, France.

- [116] Xavier MARSAULT et Hervé LEQUAY : Éco-conception pré-architecturale générative : jusqu'où peut-on aller ? Enjeux, possibilités, méthodes. *In : Séminaire de Conception Architecturale Numérique*, septembre 2016, Toulouse, France.
- [117] Julien BOUYER : *Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*. Thèse de doctorat, Sciences pour l'ingénieur. Nantes : Université de Nantes, 2009.
- [118] Laurent MALYS, Marjorie MUSY et Christian INARD : Microclimate and building energy consumption : Study of different coupling methods. *Advances in Building Energy Research*, vol. 9, n° 2, pp. 151–174, 2015.
- [119] Vida GHOLIPOUR : *Éco-conception collaborative de bâtiments durables*. Thèse de doctorat, Génie des Systèmes Industriels. Nancy : INPL, 2011.
- [120] La rédaction du MONITEUR : *BIM/Maquette numérique - Contenu et niveaux de développement*. Le Moniteur numéro 5763, Cahier détaché numéro 2, 2014, 44 p.
- [121] Thomas RECHT : *Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive*. Thèse de doctorat, Énergétique et Procédés. Palaiseau : Université de recherche Paris Sciences et Lettres, 2016.
- [122] Christoph REINHART et Carlos Cerezo DAVILA : Urban building energy modeling—a review of a nascent field. *Building and Environment*, vol. 97, pp. 196–202, 2016.
- [123] Shaun DUERR, Cristinel ABABEI et Dan IONEL : Smartbuilds : An energy and power simulation framework for buildings and districts. *In : Energy Conversion Congress and Exposition*, September 2015, Montreal, Qu., Canada.
- [124] Yang HU, David ARCHER et Hongxi YIN : Design and model based performance analysis of a district energy supply system. *In : Proceedings of the 3rd International Conference on Energy Sustainability, volume 2*, pages 187–196, July 2009, San Francisco, Ca., USA.
- [125] Paola CAPUTO, Gaia COSTA et Simone FERRARI : A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Energy Policy*, vol. 55, pp. 261–270, 2013.
- [126] Alessio MASTRUCCI, Olivier BAUME, Francesca STAZI *et al.* : A GIS-based approach to estimate energy savings and indoor thermal comfort for urban housing stock retrofitting. *In : Fifth German-Austrian IBPSA Conference*, September 2014, Aachen, Germany.
- [127] Maria Carla DI VINCENZO, Dilay KESTEN et David INFELD : Assessment of performance of building shading device with integrated photovoltaics in different urban scenarios. *In : International Conference on Sustainable Energy Technologies*, December 2010, Kandy, Sri Lanka.
- [128] Stefan GRACIK, Mohammad HEIDARINEJAD, Jiyong LIU *et al.* : Effect of urban neighborhoods on the performance of building cooling systems. *Building and Environment*, vol. 90, pp. 15–29, 2015.
- [129] Bruno BUENO UNZETA : An urban weather generator coupling a building simulation program with an urban canopy model. Master Thesis, Building Technology. Cambridge : Massachusetts Institute of Technology, 2013.

- [130] Fabrizio ASCIONE, Nicola BIANCO, Rosa Francesca DE MASI *et al.* : Design of the building envelope : A novel multi-objective approach for the optimization of energy performance and thermal comfort. *Sustainability*, vol. 7, n° 8, pp. 10809–10836, 2015.
- [131] Yi ZHANG : Use jEPlus as an efficient building design optimisation tool. *In : CIBSE ASHRAE technical symposium*, April 2012, London, UK.
- [132] Darren ROBINSON, Frédéric HALDI, Jérôme KÄMPF *et al.* : CitySim : comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. *In : Proceedings of the Building Simulation Conference 2009*, pages 1083–1090, July 2009, Glasgow, Scotland.
- [133] Darren ROBINSON, Neil CAMPBELL, W. GAISER *et al.* : Suntool – A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability. *Solar Energy*, vol. 81, n° 9, pp. 1196–1211, 2007.
- [134] Jean-Marie BAHU, Andreas KOCH, Enrique KREMERS *et al.* : Towards a 3d spatial urban energy modelling approach. *In : ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop*, November 2013, Istanbul, Turkey.
- [135] Félix-Antoine FORTIN, François-Michel DE RAINVILLE, Marc-André GARDNER *et al.* : DEAP : Evolutionary algorithms made easy. *Journal of Machine Learning Research*, vol. 13, pp. 2171–2175, 2012.
- [136] Mathieu SCHUMANN, Thierry DUFORESTEL, Hassan BOUIA *et al.* : Interdisciplinarity around design tools for new buildings and districts : the ANR MERUBBI project. *In : PLEA 2017, Conference on Passive and Low Energy Architecture*, July 2017, Edinburgh, UK.
- [137] Nicolas LAUZET, Benjamin MORILLE, Thomas LEDUC *et al.* : What is the required level of details to represent the impact of the built environment on energy demand? *In : SBE16, International Conference on Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale*, October 2016, Thessaloniki, Greece.
- [138] Jiyang LIU, Mohammad HEIDARINEJAD, Stefan GRACIK *et al.* : The impact of exterior surface convective heat transfer coefficients on the building energy consumption in urban neighborhoods with different plan area densities. *Energy and Buildings*, vol. 86, pp. 449–463, 2015.
- [139] Bruno PEUPORTIER : *Livre blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments*. Les Presses MINES ParisTech, 2013, 238 p.
- [140] Michel Y. HALLER, Robert HABERL, Tomas PERSSON *et al.* : Dynamic whole system testing of combined renewable heating systems – The current state of the art. *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 667–677, 2013.
- [141] Fernando DOMÍNGUEZ-MUÑOZ, José M. CEJUDO-LÓPEZ, Antonio CARILLO-ANDRÉS *et al.* : Selection of typical demand days for chp optimization. *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 11, pp. 3036–3043, 2011.
- [142] Samira FAZLOLLAHI, Stéphane L. BUNGNER, Pierre MANDEL *et al.* : Multi-objectives, multi-period optimization of district energy systems : I. Selection of typical operating periods. *Computers and Chemical Engineering*, vol. 65, pp. 54–66, 2014.

- [143] James MACQUEEN : Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *In : Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, pages 281–297, vol. I, December 1965 and January 1966, Berkeley, USA.
- [144] Hugo STEINHAUS : Sur la division des corps matériels en parties. *Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences*, Classe III, vol. IV, numéro 12 pp. 801–804, 1956.
- [145] Jeanne GOFFART : *Impact de la variabilité des données météorologiques sur une maison basse consommation. Application des analyses de sensibilité pour des entrées temporelles*. Thèse de doctorat, Génie Civil et Sciences de l'Habitat. Le Bourget-du-Lac : Université de Grenoble, 2013.
- [146] Kevin HARTWELL et Thomas LEDUC : T4SU : analyses et représentations des vues du ciel, du soleil et des saillances paysagères dans le contexte d'un outil de CAO. *In : SAGEO 2016*, Décembre 2016, Nice, France.
- [147] Thomas LEDUC et Kevin HARTWELL : Limiting the buildings' envelopes in order to prevent the surrounding mask effect : towards an efficient implementation in the context of SketchUp. *In : PLEA 2017, Conference on Passive and Low Energy Architecture*, July 2017, Edinburgh, UK.
- [148] Joshua KNOWLES et David CORNE : On metrics for comparing nondominated sets. *In : Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*, pages 711–716, vol. I, May 2002, Honolulu, HI, USA.
- [149] Carlos M. FONSECA, Luís PAQUETE et Manuel LÓPEZ-IBÁÑEZ : An improved dimension-sweep algorithm for the hypervolume indicator. *In : Proceedings of the 2006 Congress on Evolutionary Computation*, pages 1157–1163, July 2006, Vancouver, BC, Canada.
- [150] Joshua R. SMITH : Designing Biomorphs with an Interactive Genetic Algorithm. *In : Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, pages 535–538, July 1991, San Diego, Ca., USA.
- [151] Richard DAWKINS : *The Blind Watchmaker : Why the Evidence of Evolution Reveals a Universe without Design*. Norton & Company, 1986, 326 p.
- [152] Sabhi BEN ISMAIL, François LEGRAS et Gilles COPPIN : Un algorithme génétique interactif pour des problèmes de tournées de véhicules. *In : ROADEF 2012, treizième congrès annuel de la Société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision*, Avril 2012, Angers, France.
- [153] Ellie BAKER et Margo SELTZER : Evolving Line Drawings. *In : Proceedings of the 1994 Graphics Conference*, pages 91–100, May 1994, Banff, Al., Canada.
- [154] Xavier MARSUALT : A multiobjective and interactive genetic algorithm to optimize the building form in early design stages. *In : Building Simulation Conference 2013*, August 2013, Chambéry, France.



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : RIBAUT

DATE de SOUTENANCE : 29/09/2017

Prénoms : Clément Antoine

TITRE : Méthode d'optimisation multicritère pour l'aide à la conception des projets de densification urbaine

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2017LYSEI084

Ecole doctorale : MEGA

Spécialité : Thermique Energétique

RESUME :

La population mondiale fait face, globalement, à une urbanisation expansive. Cet étalement urbain, souvent mal contrôlé, menace aussi bien l'environnement que la santé, la qualité de vie et la sécurité alimentaire des humains. Il est possible de le limiter en lui préférant la densification urbaine. Néanmoins, la complexité des phénomènes en jeu dans un tel contexte nous incite à penser que les responsables d'opérations de densification urbaine ont besoin d'outils pour les aider à faire les choix les plus pertinents possibles. Dans un premier temps, l'état de l'art présenté dans cette thèse montre que l'outil idéal n'existe pas, et que l'optimisation multicritère par algorithme génétique est une technique adaptée à l'aide à la conception de bâtiments. Les caractéristiques souhaitables pour une méthode d'assistance des concepteurs de projets de densification urbaine sont alors précisées. Nous recommandons de baser cette méthode sur le couplage entre un algorithme génétique et un outil capable de réaliser des simulations thermiques dynamiques (STD) de quartiers. Les capacités des logiciels de STD Pleiades+COMFIE (P+C) et EnergyPlus (E+) sont situées par rapport à ces exigences, puis un premier test d'optimisation d'un projet de densification urbaine en associant EnergyPlus à un algorithme génétique est présenté. Certaines lacunes de cette méthode peuvent être comblées par la plateforme en cours de développement dans le projet ANR MERUBBI.

Dans un second temps, nous analysons donc les résultats d'une étude comparative entre P+C, E+ et l'outil MERUBBI, menée sur un projet de densification d'un îlot à forte densité urbaine. Ils montrent que ce dernier est fiable et particulièrement pertinent pour l'évaluation précise des interactions entre bâtiments. Dans un troisième temps, nous abordons la problématique de la diminution des temps de calcul, enjeu crucial pour que notre méthode d'aide à la conception soit réellement accessible aux professionnels du bâtiment. Nous proposons une technique de réduction de la période de simulation que nous présentons en détail. Enfin, la méthode d'optimisation développée est appliquée à la résolution de différents problèmes de conception du projet sus-cité, en utilisant E+. Nous montrons en quoi l'utilisation de l'outil MERUBBI enrichira cette approche, avant de conclure sur des perspectives de développement de notre méthode pour améliorer son interactivité.

MOTS-CLÉS : densification urbaine ; modèle énergétique d'un quartier ; aide à la conception ; optimisation multicritère ; algorithme génétique ; simulation thermique dynamique des bâtiments ; réduction de la période simulée

Laboratoire (s) de recherche : CETHIL

Directeur de thèse: Jean-Jacques ROUX

Président de jury :

Composition du jury :

M. MUSY, Directeur de Recherche (CEREMA Ouest), Rapporteur
T. DUFORESTEL, Ingénieur de Recherche, HDR (EDF R&D), Rapporteur
P. JOUBERT, Professeur (ULR, La Rochelle), Examineur
N. SALLE-HOYET, Professeur (ENSAV, Versailles), Examinatrice
J.-J. ROUX, Professeur (INSA-Lyon), Directeur de thèse
E. WURTZ, Directeur de Recherche (CEA), Co-directeur de thèse
A. BRUN, Ingénieur de Recherche (CEA), Invité
G. RUSAOUËN, Maître de Conférences (UCBL, Lyon), Invité