



Etude d'une procédure d'optimisation environnementale multicritère à l'échelle de l'îlot

Aurore Wurtz

► To cite this version:

Aurore Wurtz. Etude d'une procédure d'optimisation environnementale multicritère à l'échelle de l'îlot. Energie électrique. Université Paris sciences et lettres, 2022. Français. NNT : 2022UPSLM035 . tel-03926989

HAL Id: tel-03926989

<https://pastel.hal.science/tel-03926989>

Submitted on 6 Jan 2023

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.



THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à Mines Paris-PSL

**Étude d'une procédure d'optimisation environnementale
multicritère à l'échelle de l'îlot**

Soutenue par

Aurore WURTZ

Le 23 septembre 2022

Ecole doctorale n° 621

**Ingénierie des Systèmes,
Matériaux, Mécanique et
Énergétique**

Spécialité

**Énergétique et Génie des
Procédés**

Composition du jury :

Jacques TELLER Professeur Université de Liège	<i>Président</i>
Adélaïde FERAILLE Maître de conférences École des Ponts ParisTech	<i>Rapporteuse</i>
Évelyne LUTTON Directrice de recherche INRAE – AgroParisTech, UMR MIA 518	<i>Rapporteuse</i>
Christophe GOBIN Docteur Vinci Construction France	<i>Examineur</i>
Patrick SCHALBART Responsable scientifique ARMINES	<i>Examineur</i>
Bruno PEUPORTIER Directeur de recherche PSL-Mines Paris	<i>Directeur de thèse</i>

Invité au jury

Thomas RECHT

Maître de conférences – Université de Bordeaux (I2M)

Remerciements

L’aboutissement de ces trois années de travail me conduit à remercier de nombreuses personnes qui m’ont permis d’en arriver là.

Tout d’abord, je tiens à remercier Bruno Peuportier pour m’avoir fait confiance depuis mon stage de fin d’études, et surtout pour m’avoir transmis une partie de ta passion pour l’écoconception des bâtiments, ce qui m’a permis de progresser au cours de ces dernières années.

Merci également à Patrick Schalbart pour toutes les discussions approfondies qu’on a pu avoir, à Palaiseau comme en visio, et pour ton accompagnement tant au niveau professionnel que personnel tout au long de ma thèse.

Je souhaite également remercier Adélaïde Feraille et Évelyne Lutton, pour avoir accepté le rôle de rapporteur et pour vos retours bienveillants, ainsi que l’ensemble des membres du jury, présidé par Jacques Teller, pour les échanges intéressants et vos remarques constructives lors de ma soutenance. Merci également à l’ensemble des membres du Lab Recherche Environnement VinciParisTech, et aux chercheurs en ACV que j’ai pu rencontrer à l’occasion des différents séminaires internationaux organisés aux Mines. Merci également aux équipes d’Izuba et de Kocliko pour les différents échanges, notamment sur les points techniques.

Un grand merci à tous les membres de l’équipe ETB, ce fut un plaisir de travailler avec vous et merci d’être toujours partant pour un déjeuner sympathique à Palaiseau, parfois autour d’une pétanque ou d’un Mølky. Cette thèse, je l’appelle la thèse COVID, après quelques mois nous avons été contraints d’arrêter de nous côtoyer chaque jour, mais le lien que nous avons gardé malgré tout m’a beaucoup aidée. Je suis obligée de mentionner Lucas, qui m’a été d’un soutien incommensurable pendant 2 ans et demi, merci également à Rachna pour les pauses café et toutes nos discussions pour refaire le monde. Quentin, très bon ingénieur son et lumière, merci pour toute ton aide particulièrement en fin de thèse lorsque j’en avais le plus besoin, Michael pour ton dynamisme et ta bonne humeur, et Robin pour ta gentillesse. Bien sûr je n’oublie pas les « palaisiens », Fatima (merci pour la pancarte de soutien à ma soutenance), Samih, Charbel, Long, Coco, Mija et Stéphane !

Mon passage au CES m’a permis de faire de belles rencontres, je citerai tout particulièrement Joëlle pour l’aide mutuelle qu’on s’est apportée tout au long de nos thèses (bon courage pour la dernière ligne droite), Egoï, et l’ensemble de l’équipe MDE. Merci également à toutes les personnes qui nous accompagnent d’un point de vue administratif et technique, Isabelle, Rocio, Marie-Astrid, Philippe... Enfin, les enseignements m’ont également permis de faire de belles rencontres, merci à Alexis pour ta confiance et ta motivation sans faille pour monter des projets, ainsi qu’à Cyrille et Erica pour le travail intéressant que nous avons fourni ensemble.

J’en arrive à remercier mon entourage pour m’avoir toujours soutenue. Merci Sarah pour tous ces bons moments partagés, ton écoute attentive et ta joie de vivre. Merci à Mathilde et Ambre, toujours très présentes dans ma vie après plus de 15 ans d’amitié, à Florence, aux PCSI et aux GCE. Merci au groupe scout de la Butte aux Cailles de m’avoir si bien accueillie début 2020 ; merci notamment à Jean-Claude de m’avoir toujours fait confiance, et à France pour nos années en tant que co-chef et pour notre amitié qui s’est formée à partir d’une passion commune.

Merci à Julian, Aurélien, Céline et Maxime pour nos week-end copains, entre Paris, Strasbourg, Lyon et Toulouse (bientôt Cahors ?). Merci d’avoir souvent fait le déplacement pour venir me voir, jusqu’au jour de ma soutenance !

Merci à l’ensemble des personnes qui ont répondu présentes à ma soutenance, c’était un réel plaisir de partager ces trois années de travail avec un jury bienveillant, de nombreux collègues, amis et ma famille. Merci notamment à ma marraine Isabelle qui est venue avec la certitude de ne pas comprendre le sujet, à mon parrain Olivier que j’ai pu revoir après toutes ces années, à tous ceux qui ont posé un jour de congé, pris un train, organisé de près ou de loin le pot, ou tout simplement qui étaient présents.

Enfin, je voudrais remercier ma famille, mes parents de m’avoir soutenue dès le début de cette thèse, mes sœurs et mes beaux-frères pour votre présence et les jolis bébés Mathilde et Thaïs qui ont embelli mes quelques mois de rush de fin de thèse ! Et pour finir, merci à Bachir d’être à mes côtés et de m’avoir toujours soutenue.

Executive Summary

In recent decades, human activities have intensified, requiring increased consumption of natural resources to meet the needs of the human race. The consequences for the environment are manifold: disruption of ecosystems, impacts on human health and depletion of resources. The building sector is the economic sector that accounts for the largest share of final energy consumption in France; reducing the energy consumption of buildings and neighbourhoods and increasing their environmental performance is therefore becoming essential. It is particularly crucial as current decisions will determine the environmental impacts of the next few decades, due to the long lifetime of buildings. In order to limit the impacts of the building sector, applying an ecodesign approach right from the early design phases of the buildings is necessary, particularly through a global environmental assessment of potential impacts over the whole life cycle. This would help to avoid the displacement of pollution from one environmental issue to another, or from one life cycle stage to another.

This thesis focuses on the development of a multi-criteria environmental optimisation procedure at the urban block scale in order to elaborate a decision support approach for the ecodesign of neighbourhoods. A multi-building multi-criteria optimisation method is first developed in order to propose the best compromises between environmental impacts and the investment cost generated by different buildings of the neighbourhood. Then, a coupling between a 3D modelling tool commonly used in the field of architecture and a reliable tool for energy and environmental simulation of buildings is developed in order to respond to the problem of integrating LCA in the upstream phase of projects, when the important decisions are taken. In particular, this tool makes it possible to optimise the shape of buildings within an urban development project, through parametric design. Finally, the extension of the system boundaries to the neighbourhood scale is useful for decision support; other sources of impact are then integrated into the environmental assessment such as a district heating system. Since the results of such optimisation are very dependent on the assumptions defined upstream and the LCA approach, the study of the sensitivity of the results to, for e.g., behavioural parameters, provide an overall analysis of the impacts of an urban development project.

Table des matières

Remerciements	i
Executive Summary	iii
Table des matières	v
Nomenclature.....	ix
Introduction	1
1 Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers.....	7
1.1 L'écoconception des bâtiments	8
1.1.1 Problématiques de conception des bâtiments.....	8
1.1.2 Démarche d'écoconception.....	12
1.2 Analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers.....	17
1.2.1 Introduction.....	17
1.2.2 Cadre de l'étude	18
1.2.3 Inventaire	29
1.2.4 Méthode de caractérisation	31
1.2.5 Interprétation des résultats	34
1.3 Applications de l'écoconception des bâtiments	35
1.3.1 Écoconception assistée par optimisation multicritère	36
1.3.2 La conception paramétrique à l'échelle du bâtiment	41
1.4 Spécificités de l'échelle quartiers.....	44
1.4.1 Frontières du système	45
1.4.2 Conception des quartiers à moindre impact environnemental	47

1.5	Conclusion du chapitre.....	49
2	L'ACV à l'échelle d'un projet urbain	51
2.1	Description des outils et des améliorations	52
2.1.1	La suite logicielle Pleiades.....	52
2.1.2	Les outils complémentaires.....	55
2.1.3	Méthode d'allocation des impacts en fin de vie.....	60
2.1.4	Évolution de la base de données	63
2.1.5	Pré-dimensionnement de la structure	68
2.1.6	Modèle de système électrique dynamique	72
2.2	Les référentiels de performance comme aide à la décision.....	75
2.2.1	Méthodologie	75
2.2.2	Résultats	76
2.3	Cas d'étude.....	79
2.3.1	Présentation du cas d'étude.....	79
2.3.2	Optimisation du zonage thermique	83
2.3.3	Démarche d'ACV appliquée au cas d'étude	88
2.3.4	Spécificités du quartier	91
2.3.5	Résultats de simulation énergétique.....	92
2.3.6	Résultats ACV du cas d'étude	94
2.4	Conclusion	104
3	Optimisation environnementale multicritère multibâtiment	107
3.1	Développement d'un algorithme d'optimisation multibâtiment	108
3.1.1	Présentation de la démarche.....	109
3.1.2	Espace de décision	119
3.1.3	Choix de la méthode	120
3.2	Application de la méthode à un bâtiment de logements.....	132
3.2.1	Indicateurs ACV	133
3.2.2	Indicateurs de flux.....	145
3.3	Optimisation sous contrainte.....	149
3.4	Conclusion du chapitre.....	152
4	Conception paramétrique.....	155
4.1	Introduction.....	156
4.2	Description des outils.....	157

4.2.1	Suite logicielle Rhinoceros 3D	157
4.2.2	Pleiades BIM.....	160
4.2.3	Influence de la structure.....	161
4.3	Couplage des outils de modélisation et de simulation	164
4.3.1	Développements informatiques	164
4.3.2	Présentation du couplage à partir d'une modélisation Rhino.....	165
4.3.3	Modélisation Grasshopper	169
4.3.4	Vers l'optimisation multicritère de l'aménagement urbain	171
4.4	Application de la conception paramétrique à un cas d'étude.....	172
4.4.1	Proposition d'aménagement urbain	172
4.4.2	Enjeux liés à la densification des territoires.....	178
4.5	Conclusion du chapitre.....	184
5	Méthodologie multicritère d'aide à la décision à l'échelle du quartier	187
5.1	Aspects liés à l'énergie	188
5.1.1	Optimisation des systèmes de production de chaleur	188
5.1.2	Mix électrique	200
5.2	L'ACV appliquée au quartier du cas d'étude.....	205
5.2.1	Optimisation de trois bâtiments de logements	206
5.2.2	Variabilité des résultats entre logements et bureaux.....	213
5.3	Éléments complémentaires et prise en compte des comportements.....	216
5.3.1	Gestion des déchets et de l'eau	217
5.3.2	Transports	219
5.3.3	Alimentation	221
5.3.4	Installation photovoltaïque.....	222
5.3.5	Ascenseurs	224
5.4	Conclusion	226
	Conclusion et perspectives	229
	Références bibliographiques	235
	Annexes	245
	Annexe A - Cas d'étude du projet Pulse-Paris	245
	Annexe B - Cas d'étude.....	248
	Annexe C - Forfait ACV	249

Annexe D - Catégories d'aliments et quantités correspondantes du panier moyen considéré	250
Annexe E - Quantités matériaux ascenseurs	251
Liste des figures	253
Liste des tableaux	261

Nomenclature

Lettres latines

A : Classe environnementale correspondant aux meilleures pratiques

B : Classe environnementale

d : Proportion mise en décharge (%)

f_m : Fonction objectif

G : Classe environnementale correspondant aux pires pratiques

gj : Contrainte d'inégalité j à respecter

hk : Contrainte d'égalité k à respecter

i : Proportion incinérée (%)

Id : Impact de la mise en décharge

$I_{\text{évité}}$: Impact évité par le recyclage

$I_{\text{fabrication}}$: Impact de la fabrication dans le cas de la méthode 50/50

I_i : Impact de l'incinération

I_{neuf} : Impact de la fabrication du produit neuf

$I_{\text{recyclage}}$: Impact du recyclage

$I_{\text{traitement}}$: Impact du traitement après usage

J : Nombre de contraintes d'inégalité à respecter

K : Nombre de contraintes d'égalité à respecter

N : Nombre de variantes au sein des fichiers tirages

P_1 : Premier produit de la cascade de cycle de vie
 P_2 : Deuxième produit de la cascade de cycle de vie
 P_3 : Troisième produit de la cascade de cycle de vie
 Q_c : Transfert thermique avec la source chaude (J)
 Q_f : Transfert thermique avec la source froide (J)
 r_{DV} : Rapport entre la durée de vie du produit réutilisé et celle du produit neuf
 r_f : Proportion valorisée en phase de fabrication (%)
 r_t : Proportion valorisée lors du traitement après usage (%)
 S_w : Facteur solaire
 T_c : Température de la source chaude (°C)
 T_{ext} : Température extérieure (°C)
 T_f : Température de la source froide (°C)
 U_w : Coefficient de déperdition (W/(m².K))
 W : Travail fourni par le fluide (J)
 Z : Vecteur de référence
 Z' : Espace dominé

Lettres grecques

ΔT_c : Pincement thermique en surchauffe (°C)
 ΔT_f : Pincement thermique en sous-refroidissement (°C)
 ΔU : Variation de l'énergie interne du système (J)
 η_{th} : Rendement thermodynamique
 Ω : Ensemble des solutions

Autres notations et abréviations

2D : Deux dimensions
 3D : Trois dimensions

ACV : Analyse de cycle de vie

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AE : Algorithme évolutionnaire

AIE : Agence internationale de l'énergie

ANSES : Agence nationale de la sécurité et de la santé

B-Rep : *Boundary Representation*

BBC : Bâtiment à basse consommation

BEPOS : Bâtiment à énergie positive

BIM : *Building energy modelling*

BTP : Bâtiments et travaux publics

CAO : Conception assistée par ordinateur

CFD : *Computational fluid dynamics* – Dynamique des fluides numérique

COMFIE : Calcul d'ouvrages multizones fixé à une interface experte

COP : Coefficient de performance

COP_{Carnot} : Coefficient de performance de Carnot

COP_{dyn} : Coefficient de performance dynamique

CXPB : Probabilité de croisement

CVC : Chauffage, ventilation, climatisation

DALY : *Disability Adjusted Life Years* – Années de vie en bonne santé perdues

E+C- : Bâtiments à énergie positive et réduction carbone

ECS : Eau chaude sanitaire

EDF : Électricité de France

EER : *Energy efficiency ratio* – coefficient d'efficacité frigorifique

EMSD : *Electrical & Mechanical Services Department*

EnR : Énergies renouvelables

EQUER : Évaluation de la qualité environnementale des bâtiments

ETB : Écoconception et thermique du bâtiment

FREC : Feuille de Route pour l'Économie Circulaire

gbXML : *Green building XML*

GES : Gaz à effet de serre

GHG-P : *Greenhouse Gases Protocol* – Protocole sur les gaz à effet de serre

GIEC : Groupe intergouvernemental d’experts sur l’évolution du climat

GIRE : Gestion intégrée des ressources en eau

GTP : *Global temperature potential* – Potentiel de température globale

GWP : *Global warming potential* – Potentiel de réchauffement global

HQE : Haute qualité environnementale

ICV : Inventaire de cycle de vie

IFC : *Industry Foundation Classes*

ILCD : *International Reference Life Cycle Data System* – Système international de référence pour les données relatives au cycle de vie

INCA3 : Étude individuelle nationale des consommations alimentaires

INIES : Base de données nationale de référence sur les données environnementales et sanitaires des produits et équipements de la construction

ISO : *International organization for standardization* – Organisation internationale de normalisation

LTCEV : Loi de transition énergétique pour la croissance verte

LVMT : Laboratoire Ville Mobilité Transport

NSGA-II : *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*

OSB : *Oriented strand board* – Panneau de lamelles orientées

PAC : Pompe à chaleur

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

PDF : *Potentially disappeared fraction* – Fraction d’espèces potentiellement disparues

PRG : Pouvoir de réchauffement global

PV : Photovoltaïque

PVC : Polychlorure de vinyle

RCU : Réseau de chaleur urbain

RDC : Rez-de-Chaussée

RT : Règlementation thermique

RTE : Réseau de transport et d'électricité, gestionnaire du réseau électrique de transport (haute tension)

RE : Règlementation environnementale

STD : Simulation thermique dynamique

STEP : Station de transfert d'énergie par pompage

TC : Transports en commun

Introduction

Contexte environnemental

Au cours du XX^e siècle, les activités humaines se sont intensifiées à travers un système économique thermo-industriel nécessitant une consommation accrue de ressources naturelles et minières pour répondre aux besoins de l'espèce humaine. Les conséquences sur l'environnement se déclinent à différents niveaux : bouleversement des écosystèmes, impacts sur la santé humaine et épuisement des ressources.

Le GIEC, groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, a reconnu dans le deuxième volet du sixième cycle de rapports, l'AR6, l'interdépendance du climat, des écosystèmes et de la biodiversité avec les sociétés humaines. Les impacts du réchauffement climatique global (IPCC, 2013) sont de plus en plus graves et souvent irréversibles, il en résulte une nécessité d'agir à l'échelle mondiale afin de protéger les populations et les écosystèmes. En effet, le GIEC a soulevé différents points d'attention concernant l'augmentation des risques et de leur complexité, ces derniers s'intensifiant à chaque niveau de réchauffement. Les conditions futures dépendront des mesures d'atténuation actuelles. Près de la moitié de la population mondiale vit dans des contextes très vulnérables au changement climatique, et d'importantes inégalités de vulnérabilité sont constatées selon les territoires et même au sein d'une région, un risque qui s'ajoute aux inégalités déjà présentes. L'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes comme les sécheresses, les vagues de chaleur et les inondations concerne toutes les populations dès aujourd'hui. Les risques climatiques vont s'intensifier, leur apparition en cascade les rendant encore plus difficiles à gérer. Ces derniers engendrent notamment une insécurité alimentaire ainsi qu'une difficulté d'accès à l'eau pour les populations les plus vulnérables. Le GIEC insiste sur l'urgence d'agir en faveur d'un développement résilient au changement climatique notamment à travers des solutions intégrées et multisectorielles, basées sur l'atténuation des inégalités sociales, qui augmenteront la faisabilité et l'efficacité de l'adaptation de nos sociétés au changement climatique. Les solutions fondées sur l'équité, la justice sociale et climatique

Introduction

sont les plus efficaces et durables ; les différents acteurs doivent donc concilier des intérêts, des valeurs et des visions du monde divergents.

L'urbanisation peut offrir une opportunité cruciale à court terme, en faisant progresser le développement urbain à faible impact environnemental et résilient au climat, à la condition que les acteurs acceptent certains compromis. Aujourd'hui, 55 % de la population mondiale vit en zone urbaine, et une augmentation jusqu'à 68 % est prévue d'ici 2050 (United Nations et al., 2019). Tandis que nous passons près de 90 % de notre temps dans des bâtiments, il semble primordial de développer des projets d'aménagement et d'urbanisation durables, prenant en compte les aspects sociaux, économiques et environnementaux afin de réduire les inégalités en permettant un logement digne et accessible à tous, tout en préservant les ressources, la biodiversité et la santé humaine. Le bâtiment est le secteur économique représentant la plus grande part de la consommation d'énergie finale en France. Selon la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, la France a pour objectif de réduire de 40 % ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport à ses émissions de 1990. Elle vise également une réduction de 20 % de sa consommation d'énergie finale, par rapport à celle prévue en 2020. Diminuer la consommation énergétique des bâtiments et des quartiers et augmenter leur performance environnementale devient alors indispensable, d'autant plus que les décisions actuelles déterminent les impacts environnementaux des prochaines décennies, du fait de la longue durée de vie des bâtiments.

Pour limiter les impacts du secteur du bâtiment, il est nécessaire d'appliquer une démarche d'écoconception aux ensembles bâtis dès les phases amont de conception, permettant une évaluation environnementale globale des impacts potentiels sur l'ensemble du cycle de vie afin d'éviter le déplacement de pollution d'un problème environnemental à un autre ou d'une étape de cycle de vie à une autre. L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode d'écoconception adaptée au problème permettant d'évaluer la performance environnementale d'un produit et de comparer différentes variantes ayant la même fonction dans le but d'orienter la prise de décision vers des solutions à moindre impact. L'ACV est appliquée depuis les années 1990 aux bâtiments (Polster, 1995), et tend à se développer notamment à travers l'évolution des normes et des labels, dont la réglementation environnementale RE2020 qui s'est imposée récemment à la suite du label E⁺C⁻.

On trouve peu d'études dans la littérature portant sur l'analyse complète du cycle de vie des quartiers, comprenant toutes les étapes du cycle de vie et différents indicateurs environnementaux. Or à l'échelle urbaine, régionale et même nationale, l'impact environnemental d'un projet est d'autant plus important que les limites du système sont étendues ; il semble donc indispensable d'étendre les outils d'écoconception des bâtiments à l'échelle des quartiers. L'ACV à l'échelle du quartier permet d'appréhender la performance énergétique globale en intégrant les phénomènes relatifs à l'environnement urbain et d'étendre les opportunités d'amélioration, notamment par la gestion

centralisée ou la mutualisation de la production d'énergie avec la mise en place par exemple d'un réseau de chaleur urbain.

Un des principaux freins à la pratique de l'écoconception des projets urbains à l'heure actuelle repose sur la temporalité : la réalisation d'une ACV est d'autant plus utile qu'elle est menée en amont des décisions prises, après lesquelles il devient difficile d'apporter au projet des modifications, qui seraient alors trop onéreuses étant donné que de nombreux acteurs interviennent en parallèle sur le projet. Cela prendrait un temps considérable de modifier les hypothèses principales une fois le travail commencé. Or, ce sont les décisions prises en phase amont, telles que la forme des bâtiments, le matériau structurel, l'emplacement des fenêtres ou encore la composition des parois qui influencent le plus l'impact du projet sur l'environnement. À notre connaissance, les outils actuels ne permettent pas l'évaluation environnementale globale des bâtiments et des quartiers dès les premières esquisses du projet, sur lesquelles travaillent les aménageurs et les architectes en amont.

Un second frein majeur à la mise en place de cette démarche est le coût d'investissement que peuvent engendrer des solutions de bâtiments bioclimatiques. Il arrive que certains objectifs de conception soient contradictoires et qu'un compromis soit difficile à trouver. Pour cela, le recours à l'optimisation multicritère pour concevoir des bâtiments est observé dans le domaine du bâtiment depuis les années 2000 (Attia et al., 2013), mais on constate toujours le besoin d'outils d'aide à la décision nécessitant de faibles temps de calculs et présentant une garantie de fiabilité (Hashempour et al., 2020). De plus, les fonctions objectifs les plus évaluées ces dernières années sont la performance et le confort thermique, ainsi que le confort visuel et le coût global ; les émissions de gaz à effet de serre est une fonction objectif moins évaluée (Manni et Nicolini, 2022).

Objectifs scientifiques

Il s'agit dans cette thèse d'étudier une démarche permettant d'intégrer l'évaluation environnementale en phase amont des projets de conception de bâtiments à l'échelle de l'îlot en vue de constituer une aide à la décision pour l'écoconception des quartiers. Une procédure d'optimisation multicritère multibâtiment sera développée afin de proposer des compromis entre les impacts environnementaux et le coût engendrés par différents bâtiments du quartier. Une association entre des outils de conception utilisés par les aménageurs et les architectes, et un outil fiable de simulation thermique dynamique et d'analyse de cycle de vie sera présentée afin de répondre à la problématique d'intégrer l'ACV en phase amont. De plus, l'échelle du quartier et l'optimisation de la forme des bâtiments impliquent l'extension des frontières du système, intégrant d'autres sources d'impact à l'évaluation environnementale telles que le système de production de chaleur. Les résultats de telles

optimisations étant très dépendants des hypothèses définies en amont, une analyse de sensibilité permettra de fournir une vision globale des enjeux d'un projet d'aménagement urbain.

Démarche proposée

Pour répondre à ces objectifs, la première étape est de réaliser un état de l'art sur l'ACV et l'optimisation multicritère environnementale des bâtiments et des quartiers (chapitre 1). La problématique de l'écoconception est tout d'abord présentée, détaillant les différentes étapes d'un projet de conception de bâtiment et expliquant les enjeux liés à l'écoconception. La démarche de l'ACV est ensuite explicitée ainsi que ses spécificités dans les applications aux bâtiments. Un état de l'art des méthodes d'optimisation multicritère, particulièrement des algorithmes génétiques est ensuite réalisé, suivi par la définition de la conception paramétrique et de son application au bâtiment. Enfin, les spécificités de l'échelle quartier seront abordées, afin de présenter les frontières d'un tel système et certaines applications de l'optimisation.

L'analyse de cycle de vie d'un projet nécessite des outils fiables pour la simulation thermique dynamique et l'évaluation environnementale, ainsi que la détermination des hypothèses relatives à la démarche, présentées dans le chapitre 1. Des développements ont été réalisés au cours de ces travaux de thèse afin de fiabiliser les outils existants et de les adapter à la problématique de l'échelle multibâtiment et du cycle de vie, le chapitre 2 décrit les améliorations effectuées. Un travail d'aide à la décision est également présenté, dont le but est de fournir des références environnementales pour évaluer la performance environnementale d'un projet. Enfin, le cas d'étude de la thèse est présenté, ainsi que les hypothèses nécessaires à la simulation thermique et à l'ACV.

L'optimisation environnementale multicritère à l'échelle multibâtiment nécessite le développement d'un algorithme d'optimisation fiable et fonctionnel, qui sera présenté dans le chapitre 3. Une fois la procédure optimale établie, la méthode est appliquée à un cas d'étude et les différents critères environnementaux sont optimisés en parallèle du coût d'investissement des projets ; l'optimisation sous contrainte sera ensuite explorée.

Afin d'intégrer l'application de l'ACV à la phase amont des projets, un couplage entre un logiciel de conception assistée par ordinateur et un outil de simulation thermique dynamique et d'ACV nous a semblé essentiel ; ces développements feront l'objet du chapitre 4, ils permettront également d'appliquer la conception paramétrique à différents cas d'étude, dans le but de réduire les impacts environnementaux des projets lorsque les décisions prises ont une réelle influence, c'est-à-dire en phase amont.

Enfin, l'optimisation des bâtiments à l'échelle des quartiers engendre différentes incertitudes dont les effets seront évalués à travers des analyses de sensibilité ; les hypothèses relatives à l'énergie seront discutées dans un premier temps, puis la méthode sera appliquée à différents bâtiments du cas d'étude.

Pour finir, les éléments propres au fonctionnement d'un quartier, liés en particulier au comportement des occupants, feront l'objet de différentes études complémentaires.

1 Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

Ce chapitre présente un état de l'art de l'application de la méthode d'analyse de cycle de vie aux bâtiments et aux quartiers, ainsi que les récentes avancées scientifiques autour de l'ACV. Une méthode d'optimisation sera ensuite détaillée en vue d'être appliquée pour la réduction des impacts environnementaux et du coût d'investissement des bâtiments. Enfin, la spécificité des quartiers sera abordée.

1.1 L'écoconception des bâtiments

Le contexte actuel d'urgence climatique nous impose depuis quelques décennies d'introduire les enjeux de durabilité et de performance environnementale des services, objets, concepts et projets. Le secteur du bâtiment est concerné, d'autant plus que la longue durée de vie des bâtiments implique une quantité importante d'impacts environnementaux tout au long du siècle suivant leur construction. L'aspect environnemental doit donc être intégré afin de réduire les impacts dès la phase amont des projets de conception des bâtiments, lorsque les grands axes des projets sont définis. Pour cela, des outils d'aide à la conception sont nécessaires. La démarche d'écoconception est alors utilisée afin de concevoir des bâtiments à moindres impacts environnementaux.

1.1.1 Problématiques de conception des bâtiments

1.1.1.1 La conception d'un bâtiment

La conception d'un bâtiment est un projet complexe en lui-même étant donné qu'un bâtiment n'est pas conçu à partir d'un prototype, contrairement à de nombreux produits industriels ; le bâtiment est conçu en fonction de l'environnement dans lequel il est situé et selon les exigences du client (la maîtrise d'ouvrage). Il convient également de respecter les normes en vigueur, imposant des performances thermiques et environnementales.

Jusqu'en 1975, la conception des bâtiments était régie par l'expérience des maîtres d'œuvre acquise au cours du temps. La première réglementation thermique, RT 1974, imposa des exigences thermiques lors de la conception de bâtiments neufs d'habitation. La norme s'est ensuite actualisée au cours des décennies, s'étendant dans un premier temps à d'autres usages de bâtiments, puis définissant des seuils de plus en plus restrictifs. La première réglementation environnementale, RE2020, s'est imposée très récemment, au 1^{er} janvier 2022, introduisant la prise en compte des émissions de gaz à effet de serre (GES), à la suite du label Bâtiment à Energie Positive et Réduction Carbone E⁺C⁻.

Un projet de conception s'organise en différentes phases appartenant à un schéma classique détaillé ci-après :

- L'étude de faisabilité. Il est nécessaire de vérifier la faisabilité technique du projet avant de le lancer. Cette étape permet de s'assurer que les caractéristiques du terrain permettent l'implémentation du bâtiment et des systèmes associés au projet.
- La programmation. Les objectifs de performance et les exigences fonctionnelles qui permettront de concevoir le bâtiment sont rédigés sur un document dénommé le programme.
- La conception. Cette étape est organisée en trois parties ; les architectes (et éventuellement ingénieurs) de la maîtrise d'œuvre proposent une ou plusieurs esquisses lors de la première étape

de conception. Le chef de projet choisit une des propositions et lance la conception détaillée, durant laquelle les éléments principaux tels que le type de structure, la façade et les systèmes CVC sont définis. Enfin, la phase d'étude de projet consiste à choisir les finitions (revêtements, matériaux pour les portes etc.)

- La construction. Le chantier est ensuite réalisé par les différentes entreprises contractées en vue de la réception et de la mise en service des équipements.

Les étapes précédant la construction seront considérées dans cette thèse comme les phases amont de conception. Bien qu'indispensables, les étapes de conception et de construction du bâtiment ne durent que quelques années et ne représentent temporellement qu'un faible pourcentage du cycle de vie du bâtiment. On dit de la construction que c'est un produit à cycle long (Gobin, 2010). Le bâtiment entre ensuite dans une phase d'exploitation qui correspond à son utilisation, durant une période qui sera en général assez longue. Cette durée peut varier selon le type d'usage, les décisions politiques ou encore les exigences du propriétaire, et sera entrecoupée de travaux de rénovation. Enfin, on parlera de déconstruction ou de fin de vie du bâtiment, étape durant laquelle les déchets seront traités.

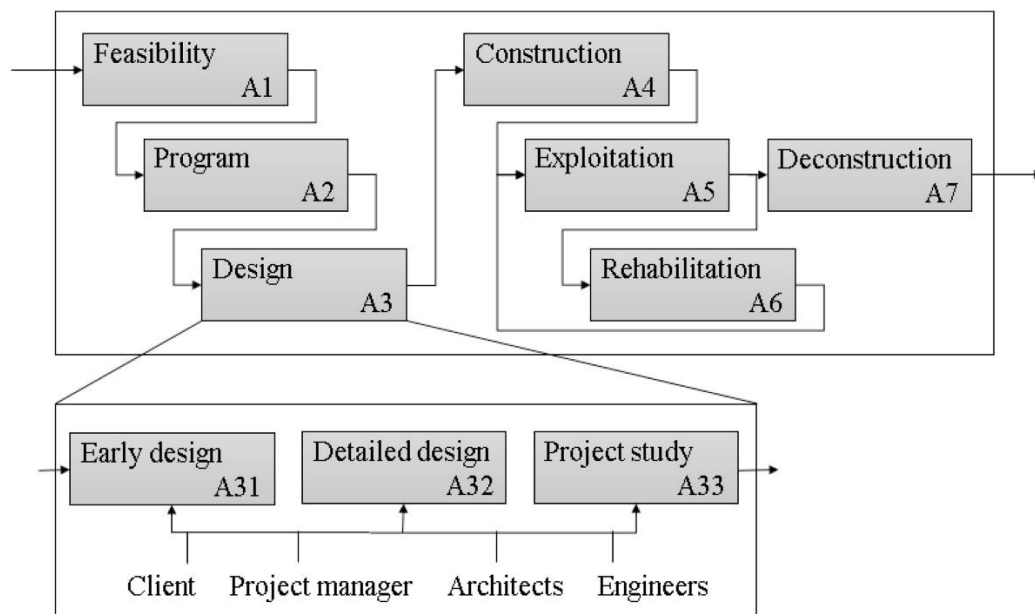


Figure 1-1 : Modèle du cycle de vie d'un bâtiment (Lamé et al., 2017)

1.1.1.2 La communication entre les parties prenantes

Les différentes phases présentées dans la section précédente font intervenir de nombreux professionnels de domaines de compétences variées. L'architecte pilote généralement le projet dont la finalité doit convenir à la maîtrise d'ouvrage, et de nombreux acteurs interviennent dans le projet, dont les bureaux d'études techniques, les entreprises de BTP ou encore les fabricants de matériaux et de systèmes. Dans le cas des plans d'aménagement urbain, d'autres acteurs entrent en jeu, notamment les

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

gestionnaires de parcs immobiliers, les urbanistes et les aménageurs. La communication entre tous ces acteurs est primordiale pour le bon fonctionnement du projet, chaque professionnel apportant des compétences spécifiques nécessaires à la viabilité du projet et à la pertinence de sa conception.

La méthodologie BIM (*Building Information Modelling*) s'est développée en vue de répondre à la problématique de communication entre les parties prenantes. En numérisant les données du bâtiment, les outils BIM proposent une modélisation 3D de chaque élément de la conception et facilitent la collaboration entre les secteurs de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction au sein d'un projet. Tous les professionnels travaillant sur le projet ont accès à l'ensemble des données en temps réel, ce qui peut permettre une amélioration des méthodes de travail, et surtout faciliter la communication, l'échange et la gestion de données entre les équipes de conception et de construction. Le modèle comprend les caractéristiques du bâtiment relatives à sa conception et à sa construction, mais aussi les informations nécessaires à son entretien, sa maintenance, d'éventuelles modifications ainsi qu'à sa fin de vie. L'outil est conçu autant pour les projets de petite ampleur, tels que la construction d'une maison ou d'une route, que pour les plans d'aménagement urbains. Il permet de répondre plus facilement aux exigences du client en assurant par exemple le confort des occupants, un niveau de performance élevé et des économies d'énergie.

1.1.1.3 Les enjeux de la conception de bâtiments

Les enjeux actuels imposent au secteur du bâtiment de s'aligner sur le concept de développement durable, dont l'objectif est de répondre aux besoins actuels sans compromettre les capacités des générations futures (Brundtland, 1987). Cependant, garantir les besoins actuels dans le contexte de croissance économique dans lequel nous vivons implique la consommation de nombreuses ressources pour garantir voire accroître le niveau de confort que nous avons ; tandis que préserver les générations futures nécessite de protéger les ressources en eau, en énergie, en matières premières, ainsi que la santé et la biodiversité. Ainsi, le concept de développement durable met en relation des éléments parfois contradictoires, d'où la complexité du défi à relever (Peuportier et al., 2013). Il se traduit en trois axes : limiter les impacts environnementaux, sociaux et économiques. À cela peut s'ajouter un quatrième axe culturel ; le bâtiment s'intègre au sein d'un patrimoine, et fait l'objet d'exigences en termes d'esthétique, autant de la part des propriétaires que des collectivités. La caractérisation de la performance d'un bâtiment est donc complexe, de par la multitude de ses fonctions.

Les techniques de construction ont évolué rapidement au cours des dernières décennies, l'enjeu actuel repose sur l'élaboration d'un compromis entre les différentes exigences. Les professionnels de la construction relèvent la nécessité d'outils d'analyse multicritère répondant aux objectifs économiques, sociaux et environnementaux, ainsi que des références correspondantes permettant une aide à la décision (Lamé et al., 2017).

La mise en place de certifications environnementales et de labels tels que la démarche HQE « Haute Qualité Environnementale », les labels BBC « Bâtiment basse consommation », BEPOS « Bâtiment à Energie POSitive », ou encore E⁺C⁻ montrent la volonté d'améliorer la qualité environnementale des bâtiments. Les normes de construction jouent également un rôle dans la diminution des impacts environnementaux, dans un premier temps par la limitation de la consommation d'énergie, et plus récemment, comme indiqué précédemment, dans l'intégration d'exigences inspirées du label E⁺C⁻ dans la réglementation RE2020. L'objectif de réduction des consommations d'énergie durant l'utilisation du bâtiment amène cependant un nouvel enjeu qui est d'éviter le déplacement du problème d'une étape à l'autre du cycle de vie du bâtiment. Nous considérerons alors les impacts d'un bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie.

Un autre enjeu repose sur la temporalité ; les décisions les plus influentes sont celles qui sont prises en phase amont (choix du site, orientation du bâtiment, choix de la structure, de l'isolation, etc.), soit dès les phases de programmation et d'esquisse. Or à ce stade de nombreuses caractéristiques du bâtiment ne sont pas encore définies, les incertitudes sont donc élevées. Cependant, plus les phases du projet sont avancées, plus la remise en question des choix devient difficile car le coût engendré est alors très élevé. La pertinence des décisions et les incertitudes associées au cours des différentes phases d'un projet de conception sont illustrées à la Figure 1-2. Cela montre l'importance de prendre en compte la performance environnementale dès les phases amont, malgré les contraintes rencontrées.

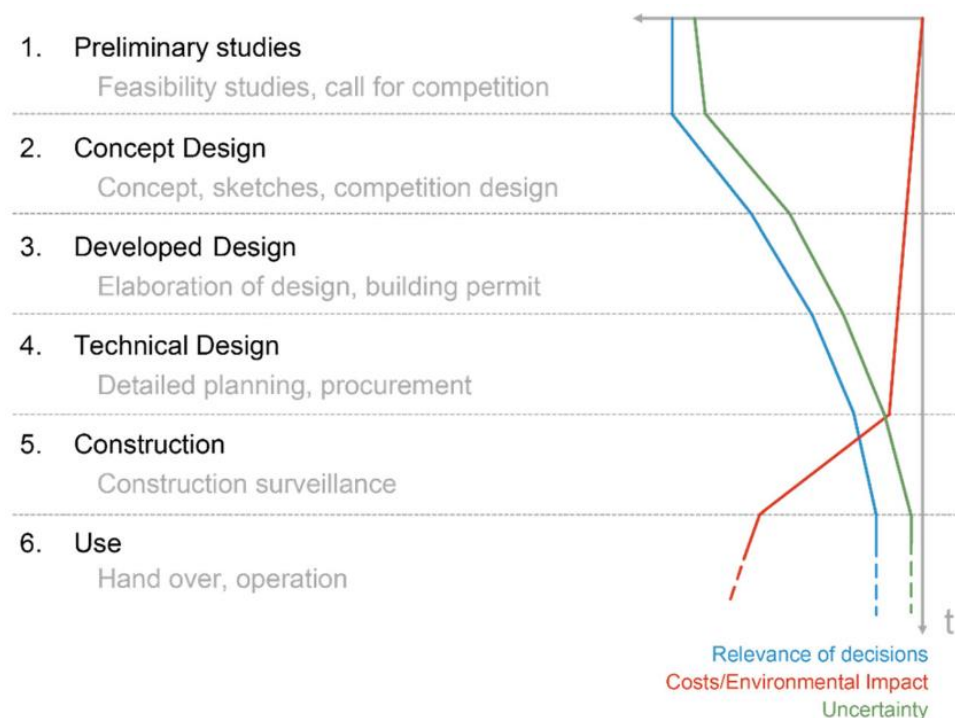


Figure 1-2 : Pertinence des propositions et incertitudes associées au cours d'un projet de conception de bâtiment (Hollberg et Ruth, 2016)

Nous présenterons dans la partie suivante la méthode d'écoconception, une méthode qui peut répondre aux différents enjeux mentionnés si elle est appliquée dès la phase amont des projets.

1.1.2 Démarche d'écoconception

1.1.2.1 Définitions

L'écoconception consiste à prendre en compte les aspects environnementaux dans la phase de conception, et favorise le dialogue entre les métiers de l'architecture et de l'ingénierie. La norme ISO 14006, relative aux systèmes de management environnemental, définit la méthode de l'écoconception comme une « approche méthodique qui prend en considération les aspects environnementaux du processus de conception et développement dans le but de réduire les impacts environnementaux négatifs tout au long du cycle de vie d'un produit ». L'objectif est d'accompagner le client afin qu'il prenne des décisions en accord avec ses exigences et les impacts environnementaux qu'elles engendrent. Cette démarche peut être utilisée en tant que méthodologie de pilotage du processus de conception, et comme outil de mesure et d'aide à la décision.

L'écoconception se développe peu à peu dans le domaine des ensembles bâtis. Il s'agit de minimiser les impacts sur l'environnement lors de la construction de bâtiments de logements, de loisirs, de services, et des réseaux d'eau, d'énergie, d'information, etc. Les caractéristiques de conception sont cependant

différentes des produits provenant de l'industrie. La durée de vie des bâtiments est très longue et de nombreuses parties prenantes contribuent au projet tout au long du cycle de vie du bâtiment. Le bâtiment est alors considéré comme un système complexe, intégrant de nombreux composants et matériaux dont la durée de vie diffère.

La démarche est précédée par une analyse globale des problèmes environnementaux actuels et futurs, qui a conduit à la création d'indicateurs environnementaux voués à catégoriser et à quantifier les problèmes décelés (Peuportier, 2008). Une analyse environnementale est effectuée afin de définir les choix stratégiques à appliquer dans la recherche de compromis ou de synthèse entre les aspects environnementaux, sociaux et économiques, pour ainsi proposer une aide à la décision destinée aux acteurs des différentes étapes du projet de conception du bâtiment. L'écoconception s'applique à chaque étape du projet, l'analyse environnementale est donc nécessaire lors des différentes phases de conception du bâtiment.

L'écoconception prend en compte les impacts sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Dans le cas du bâtiment, le cycle de vie est divisé par exemple en quatre étapes :

- La construction rassemble l'extraction et le transport des matières premières, la fabrication et le transport des produits de construction, et la réalisation (sur le chantier en général).
- L'utilisation : période durant laquelle le bâtiment est exploité.
- La rénovation : rénovations et réhabilitations effectuées au cours de la vie du bâtiment, comprenant notamment le remplacement régulier des équipements, des fenêtres et des revêtements.
- La fin de vie : la déconstruction du bâtiment et le traitement des déchets. Selon leurs caractéristiques, les matériaux en fin de vie sont mis en décharge, incinérés, recyclés ou réutilisés dans un autre projet.

La caractéristique multi-étapes de la méthode d'écoconception permet une vision globale des impacts évitant ainsi un déplacement de pollution d'une étape du cycle de vie à l'autre. Par exemple, l'ajout d'une grande quantité d'isolant peut considérablement diminuer les consommations énergétiques et les impacts environnementaux associés, mais le choix de l'isolant aura toute son importance car les impacts de la fabrication de l'isolant en usine peuvent être élevés selon le matériau sélectionné ; la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie permet de considérer la totalité des impacts induits par le bâtiment.

L'approche permet également d'éviter un transfert de pollution d'un problème environnemental vers un autre grâce à la prise en compte de plusieurs indicateurs environnementaux. La nécessité de cette caractéristique multicritère s'illustre bien par le remplacement des équipements de production de chaleur ; une chaudière gaz assurant le chauffage d'un bâtiment émet une quantité importante de gaz à effet de serre, l'impact négatif sur l'indicateur de changement climatique est conséquent. Le

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

remplacement de cette chaudière gaz par une chaudière bois réduit considérablement les impacts sur le changement climatique, mais l'approvisionnement en bois a un impact négatif sur l'utilisation des sols et la combustion du bois impacte la santé. La vision d'ensemble est primordiale lorsqu'il s'agit de préserver l'environnement, et la méthode d'écoconception est appropriée pour répondre à cette problématique.

Différentes méthodes d'écoconception sont d'ores et déjà mises en application dans le domaine du bâtiment, dont la méthode de l'analyse de cycle de vie (ACV) et l'étude d'impact. L'ACV est un outil évaluant l'ensemble des impacts environnementaux d'un produit sur son cycle de vie dans le but de réduire ses impacts, tandis que l'étude d'impact a une application plus ciblée, elle s'applique par exemple à l'impact d'une usine déjà implémentée, et considère donc les impacts locaux. Les impacts environnementaux doivent être pris en compte dès la phase amont des projets de conception, cependant étant donnée qu'à cette étape les fabricants, et donc les lieux de fabrication des produits, ne sont pas encore connus, on privilégiera une ACV en prenant des valeurs moyennes d'impacts à l'analyse d'impact (Peuportier et al., 2013). Une étude d'impact peut tout de même être effectuée en complément de l'ACV, cela permettrait d'enrichir les connaissances et les propositions faites pour réduire les impacts, surtout si le bâtiment comprend une source de pollution importante comme une chaufferie de grande taille. La méthode de l'analyse de cycle de vie sera présentée en deuxième partie de ce chapitre.

1.1.2.2 Matériaux et équipements

L'étape d'utilisation est celle qui génère la majorité des impacts d'un bâtiment standard. Mais l'évolution des réglementations et des labels, ainsi que le prix croissant de l'énergie, orientent la construction et la rénovation des bâtiments vers une réduction des consommations énergétiques. Les autres étapes du cycle de vie du bâtiment (construction, rénovation et fin de vie) prennent alors une part plus importante (Blengini et Di Carlo, 2010). Un des enjeux phares de l'écoconception concerne alors l'utilisation des ressources pour la fabrication des matériaux de construction ; selon la commission européenne, plus d'un tiers de la consommation mondiale des ressources est affectée aux matériaux de construction et au secteur du bâtiment. De plus, la consommation de matières premières devrait doubler entre 2010 et 2050. Les matériaux de construction génèrent de nombreux impacts environnementaux à travers l'extraction des matières premières, leur transport et les procédés de fabrication et de traitement en fin de vie (Augiseau et Barles, 2017).

L'écoconception consiste à prendre en compte les impacts environnementaux dès la phase de conception, l'objectif est donc de minimiser les impacts de la fabrication des matériaux et des équipements, mais il s'agit également d'optimiser les impacts de la fin de vie. Cette dernière phase génère de nombreux déchets qui peuvent être traités de différentes manières. Le déchet peut être défini comme une substance ou un objet dont le détenteur se défait ou doit se défaire. Les différentes

possibilités de gestion des déchets sont présentées ci-dessous, et l'échelle de Lansink qui établit un ordre de priorité entre ces dernières est illustrée Figure 1-3.

1. Prévention : éviter de générer les déchets.
2. Réutilisation/réemploi : opération par laquelle un produit, un composant ou un déchet est utilisé de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel il avait été conçu, sans opération de traitement.
3. Recyclage : opération de valorisation d'un déchet en vue de le réutiliser, après un processus de traitement et de transformation.
4. Récupération d'énergie : récupération et valorisation de l'énergie produite lors du traitement des déchets sous forme de chaleur, d'électricité ou de carburant.
5. Incinération.
6. Décharge.

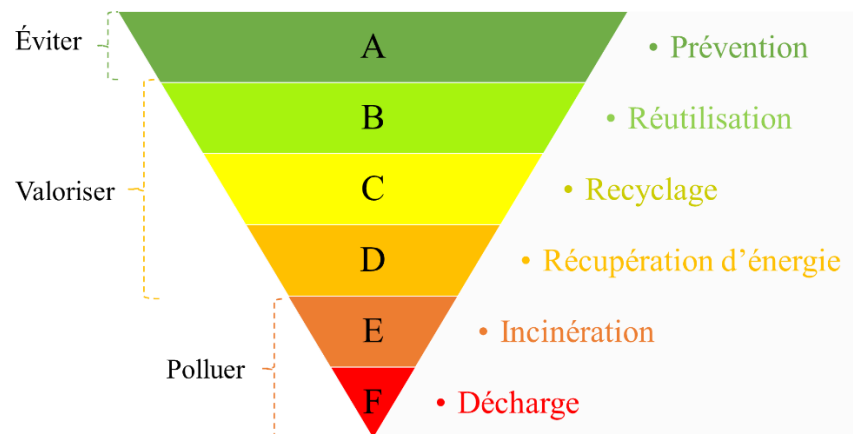


Figure 1-3 : Échelle de Lansink émettant un ordre de priorité entre les possibilités de gestion des déchets

Le cadre législatif de la gestion des déchets évolue. En 2015, la loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTCEV) se focalisait sur l'augmentation des taux de valorisation des déchets, avec l'objectif d'atteindre le seuil de 70 % de valorisation de la matière à horizon 2020. Le réemploi est donc de plus en plus favorisé, notamment dans les appels d'offres publiés par l'Etat ou par les collectivités territoriales. La feuille de Route pour l'Economie Circulaire (FREC) a été publiée en 2018, elle vise à orienter les décisions afin de passer d'un modèle linéaire à un modèle circulaire. La loi Anti-Gaspillage pour une Economie Circulaire détaille les manières de lutter contre toutes les formes de gaspillage existantes. Enfin, plusieurs labels et certifications prennent en compte le modèle circulaire du bâtiment, favorisant le réemploi et le recyclage des composants.

1.1.2.3 Développement des systèmes énergétiques

L'étape d'utilisation du bâtiment, responsable d'une importante part des impacts, comprend notamment le chauffage, l'utilisation d'eau chaude sanitaire et le cas échéant la climatisation. Les

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

systèmes énergétiques font partie des éléments dont la réduction des consommations et des impacts environnementaux associés est primordiale. Cela peut se traduire d'une part par l'amélioration de la performance énergétique du système, et d'autre part par la mise en place de nouveaux systèmes à moindre impact sur l'environnement. La prise en compte des besoins de climatisation dans la RE2020 impose notamment de s'intéresser aux systèmes de production de froid. Deux cas particulier sont présentés dans les paragraphes suivants.

D'après l'ADEME, la climatisation représente 5 % des émissions de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment et 4,5 % des émissions totales générées par la production d'électricité en France (ADEME et CODA STRATEGIES, 2021). La contribution à l'effet de serre des émissions de fluide frigorigène est mesurée à travers leur Pouvoir de Réchauffement Global (PRG). Il mesure l'impact relatif du fluide par rapport à l'émission d'une quantité équivalente de CO₂ dans l'atmosphère. Par exemple, le fluide R410A, largement présent dans les équipements de climatisation, affiche un PRG de 2038. Cela signifie que son émission a un pouvoir de réchauffement sur 100 ans 2038 fois supérieur à l'émission d'une quantité équivalente de CO₂.

L'évolution de la réglementation tend à privilégier les fluides frigorigènes à faible PRG et à l'horizon 2030 toutes les installations frigorifiques devront être alimentées par des fluides frigorigènes à moindre impact. Le PRG du CO₂ est par définition égal à 1, ce fluide frigorigène est dit à faible PRG, il est non inflammable, et à haute performance ; il permet de produire de l'ECS en été comme en hiver, le fonctionnement est optimal jusqu'à -3 °C et à plus faible puissance jusqu'à -25 °C. Le dioxyde de carbone (R 744) et l'ammoniac (R 717) se rapprochent davantage des exigences de la nouvelle réglementation des fluides frigorigènes en 2019. Leur utilisation se démocratise dans le secteur de la réfrigération et de nombreuses études récentes sont présentes dans la littérature (Velasco et al., 2022 ; Qin et al., 2022 ; Wang et al., 2022 ; Okasha et al., 2022).

Les pompes à chaleur à sonde géothermique sont également un moyen de réduire les consommations énergétiques et les impacts environnementaux. Dans le cas d'une forte densité urbaine, la surface au sol est souvent limitée et réduit la possibilité d'installer des échangeurs de chaleur horizontaux, ce qui oriente le champ de recherche vers les échangeurs à sonde géothermique verticale. Pei (2020) propose un nouveau modèle pour réduire la consommation d'énergie des systèmes de pompe à chaleur à sonde géothermique verticale à travers l'évaluation rapide du facteur de réponse thermique du champ de forage.

La transition énergétique fait également émerger l'exploitation des énergies renouvelables (EnR) telles que la production d'électricité par les systèmes photovoltaïques et éoliens. Ces systèmes ne sont cependant pas irréprochables, ils émettent des impacts lors de leur fabrication, maintenance et fin de vie. L'ACV se montre particulièrement nécessaire pour évaluer leur intérêt global, et les études existantes montrent que les systèmes EnR présentent généralement de plus faibles empreintes environnementales

que leurs alternatives fossiles malgré leur météo-dépendance. L'intégration de technologies de production d'énergie renouvelable dans le mix électrique nécessite des dispositifs de stockage pour assurer la disponibilité de l'électricité au moment de la demande et ainsi assurer l'équilibre du réseau. L'installation de panneaux photovoltaïques pour l'autoconsommation peut faciliter la tâche complexe d'équilibrage du réseau électrique. L'ajout d'un système de stockage pour adapter temporellement la production et la consommation personnelle pourrait cependant conduire à doubler l'empreinte carbone de l'énergie consommée par rapport à la production de l'électricité négligeant son stockage. Cet impact reste néanmoins plus faible que les alternatives fossiles (Besseau, 2019).

Ainsi, le principe d'écoconception nécessite la prise en compte large des impacts des différentes étapes du cycle de vie, de la fabrication des matériaux à leur traitement en fin de vie, en passant par la réduction des consommations énergétiques et des impacts environnementaux relatifs à l'étape d'utilisation du bâtiment. La section 1.2 présentera la méthode de l'analyse de cycle de vie, à travers laquelle nous proposons d'appliquer l'écoconception.

1.2 Analyse de cycle de vie des bâtiments et des quartiers

1.2.1 Introduction

L'analyse de cycle de vie (ACV) est un outil d'écoconception axé sur le bilan environnemental, qui propose une aide à la décision utile à la mise en place des politiques environnementales et à la réalisation d'un projet. Cette méthode permet d'évaluer les impacts environnementaux des produits, systèmes et procédés en prenant en compte toutes les substances émises et extraites de l'environnement sur la totalité du cycle de vie. Il s'agit d'une approche globale, identifiant les impacts environnementaux les plus importants afin de les réduire tout en évitant un déplacement de pollution entre les différentes étapes du cycle de vie, d'un indicateur environnemental à un autre, ou encore entre différents lieux d'émissions. Par exemple, l'utilisation des voitures électriques réduit les impacts urbains, mais augmente les impacts induits par la fabrication des batteries en usine et des centrales de production d'électricité.

Une démarche d'ACV se déroule en quatre étapes : la définition des objectifs, l'inventaire, l'évaluation des impacts sur l'environnement et l'interprétation des résultats (ISO 14044, 2006).

La première étape consiste à définir le **cadre de l'étude**, afin de définir les **objectifs** du projet. Ces derniers peuvent largement varier selon les projets d'aménagement urbain et de conception ou de rénovation des bâtiments, leurs degrés de liberté (choix du site, agencement du quartier) et contraintes associées (budget limité, esthétique). Une unité fonctionnelle est définie à titre de référence pour la comparaison de variantes environnementales. Elle comprend la fonction principale du système, la quantité de référence, le niveau de performance et la durée de vie du système. À partir du cadre établi,

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

les hypothèses concernant l'énergie, les transports et le traitement de fin de vie des éléments sont discutées (Polster et al., 1996 ; Peuportier, 2008).

Les substances émises et extraites de l'environnement au cours du cycle de vie du bâtiment sont répertoriées lors de l'**inventaire du cycle de vie** (ICV). Cela consiste à comptabiliser les flux traversant le système, depuis l'extraction des matières premières pour la fabrication des matériaux jusqu'à la fin de vie du bâtiment et le traitement des déchets, en passant par le transport des matériaux, la construction du bâtiment, son utilisation (étape d'occupation) et sa rénovation. La qualité de l'inventaire dépend de la base de données utilisée, notamment du nombre de données accessibles, de leur fiabilité, leur représentativité (localisation, technologies récentes) ainsi que de leur actualisation. Les résultats de la phase d'analyse d'inventaire serviront de base à l'évaluation environnementale des projets, et peuvent amener à réajuster le cadre de l'étude en fonction des données disponibles. Les bases de données environnementales recensent les flux intrants et sortants de nombreux produits et fournissent un inventaire de cycle de vie.

L'étape d'**évaluation des impacts** vise à transformer l'inventaire de flux défini précédemment en une série d'impacts potentiels clairement quantifiés. Il s'agit dans un premier temps de définir les catégories d'impacts qui seront utilisées dans l'évaluation environnementale d'un système, puis de classer les flux dans des catégories d'impacts auxquels ils contribuent, et enfin d'estimer les dommages potentiels à partir des impacts sur l'environnement. L'ILCD (*International Reference Life Cycle Data System*) a publié des recommandations pour le choix des indicateurs environnementaux dans son guide (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010).

Enfin, les résultats des ACV sont analysés et **interprétés**, souvent dans le cadre de la comparaison de variantes. Cette phase permet de répondre aux questions posées en amont de l'ACV à travers des recommandations tirées des résultats, mais aussi d'ajuster les hypothèses prises lors des premières étapes de cette démarche, telles que l'étendue du système ou l'unité fonctionnelle. Plusieurs méthodes existent pour faciliter l'interprétation des résultats, notamment l'analyse de sensibilité (Heijungs, 2010), l'analyse d'incertitudes, de contribution, l'analyse de perturbation, l'analyse comparative et l'analyse de discernabilité (Heijungs et Kleijn, 2001).

1.2.2 Cadre de l'étude

1.2.2.1 Objectifs et champ de l'étude

L'application de la méthode de l'analyse de cycle de vie au bâtiment a pour principal objectif d'orienter un projet de conception vers des décisions à moindres impacts environnementaux. La définition des objectifs et du cadre de l'étude est la première étape de la démarche de l'analyse de cycle de vie, car elle définit le système étudié et ses limites pour l'ensemble du projet. Selon la norme, les

objectifs doivent clairement indiquer l'application de la méthode, les raisons pour lesquelles elle est appliquée et les destinataires de l'étude (ISO 14044, 2006). Les objectifs dépendent des acteurs du projet et de la problématique associée au cas étudié, ils peuvent considérablement varier selon le contexte.

L'application de la méthode d'ACV est utile à de nombreux acteurs des projets de construction et de réhabilitation de bâtiments tels que les architectes (comparaison environnementale de variantes en phase de conception), les fabricants (écoconception des matériaux et équipements), les gestionnaires des structures (action sur le comportement des occupants et mesures prises durant l'étape d'utilisation du bâtiment) et enfin les propriétaires et collectivités locales, pour lesquels l'ACV des projets assure un certain niveau de performance environnementale.

La méthode d'ACV est adaptée aux projets de construction et de réhabilitation des bâtiments de par son approche multicritère et multi-étapes, calculant ainsi l'ensemble des impacts du cycle de vie des bâtiments. Quelques exemples d'objectifs d'application de l'ACV au secteur du bâtiment sont présentés ci-après :

- Choix du site : définir l'orientation du bâtiment afin de maximiser les apports solaires pour réduire les impacts induits par le chauffage, considérer les distances quotidiennes des occupants ainsi que la distance entre le bâtiment et les transports en commun existants afin de maîtriser les impacts dus au transport des occupants, prendre en compte la gestion des déchets.
- Programmation : intégration de l'ACV au cahier des charges de conception.
- Conception : aide à la décision par la comparaison de variantes architecturales et techniques.
- Choix des produits : comparaison des matériaux selon les fournisseurs.
- Réhabilitation : comparaison de variantes afin de proposer le plan de rénovation le plus performant pour un coût donné.
- Opération de démolition d'un bâtiment : établir l'intérêt du recyclage ou de la mise en décharge des différents éléments, selon la distance avec les sites de traitement des déchets.

L'application de l'ACV aux bâtiments ne se limite pas nécessairement à l'échelle d'un bâtiment, mais peut également s'étendre aux quartiers. Dans ce cas, les objectifs de l'ACV changent également d'échelle. Il peut s'agir des exemples suivants :

- Comparer la forme, la localisation et le nombre des bâtiments implémentés, pour une surface utile et une surface habitable fixes afin d'établir l'influence de la densité du quartier et de l'aménagement du quartier.
- Déterminer l'impact des infrastructures du quartier et des espaces ouverts sur l'indicateur d'occupation des sols (Trigaux et al., 2017).
- Analyser l'influence de l'évolution temporelle des paramètres et des potentielles avancées futures concernant les modes de transport et les typologies de bâtiments (Stephan et al., 2013).

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

De la définition des objectifs découle le cadre de l'étude qui doit également être défini lors de cette première étape de l'ACV. Il comprend toutes les unités fonctionnelles, la description et les limites du système, les hypothèses, le type d'impacts et la méthodologie.

La norme ISO 14040 définit l'unité fonctionnelle comme la performance quantifiée d'un système en vue d'être utilisée comme unité de référence dans une analyse de cycle de vie. Elle doit contenir la fonction principale du système étudié, sa qualité, sa durée et la quantité de référence. Par exemple, l'unité fonctionnelle d'une maison individuelle peut être décrite comme la nécessité de loger toutes les personnes de la famille pour un niveau de confort donné, ramenée à 1 m² de surface habitable et à une année. L'intérêt de pouvoir réduire les indicateurs par unité de surface et par année repose sur la possibilité de comparer la performance du projet étudié à des références qui peuvent être d'autres variantes, ou les performances des meilleures pratiques.

Le système comprend le ou les bâtiments étudiés avec la parcelle correspondante, et les frontières associées dépendent de l'objectif défini. L'ACV des bâtiments nécessite la modélisation d'un système plus large que le bâtiment étudié, car de nombreux impacts ne sont pas créés au sein du bâtiment. Les impacts associés à l'utilisation d'eau proviennent du traitement de potabilisation dont la filtration et la désinfection, et de l'assainissement de l'eau ; les impacts relatifs à l'électricité sont majoritairement créés dans les centrales électriques, et les impacts d'un matériau de construction proviennent de l'extraction des matières premières, du transport et de sa fabrication en usine. Le transport des occupants et la gestion des déchets sont également extérieurs au bâti, leurs impacts peuvent être comptabilisés ou non lors de l'ACV d'un bâtiment, selon les objectifs de l'étude. Après avoir défini les frontières du système, les hypothèses relatives à la gestion de l'énergie, au transport et au recyclage sont déterminées.

Les études ACV peuvent être divisées en deux catégories : l'approche attributionnelle et l'approche conséquentielle. Ces approches permettent de répondre à différents objectifs ; d'une part l'ACV attributionnelle a pour but de recenser l'ensemble des impacts environnementaux associés au système étudié à un instant donné, tandis que l'approche conséquentielle présente les impacts correspondant aux conséquences de la décision correspondant à la réalisation du projet (Weidema et al., 2009). L'ACV conséquentielle met en évidence le lien entre le projet et le contexte économique et infrastructurel (Roux, 2016).

1.2.2.2 Choix méthodologiques

La définition des objectifs et du cadre de l'étude de l'ACV implique de faire de nombreux choix méthodologiques, notamment concernant les hypothèses à définir, mentionnées dans le paragraphe précédent. Les principales décisions à prendre avant d'effectuer une ACV sont présentées ci-après, et les choix relatifs à ces travaux de thèse seront explicités dans le deuxième chapitre.

La réalisation d'une étude ACV dépend fortement de la méthode d'allocation choisie, ainsi que du choix entre les approches attributionnelle et conséquentielle.

❖ Allocations de fin de vie et gestion des déchets

L'allocation concerne la répartition des impacts entre par exemple plusieurs co-produits fabriqués dans une même usine (par exemple une aciérie qui produit à la fois de l'acier et du laitier), ou entre le producteur et le consommateur d'une matière issue du recyclage (par exemple le laitier peut être utilisé pour remplacer le ciment au lieu d'être mis en décharge). Le recyclage génère des impacts, mais évite le traitement d'un déchet et la production d'un matériau neuf ce qui aboutit généralement à un bénéfice environnemental. Ce bénéfice peut être attribué pour partie à l'acteur qui recycle le produit et pour partie à celui qui utilise le produit recyclé. Il existe plusieurs méthodes d'allocation, par exemple la méthode des stocks (l'impact évité de traitement du déchet est alloué au producteur, l'impact du recyclage et l'impact évité de la fabrication neuve sont alloués à l'utilisateur), l'allocation économique (l'impact total de l'aciérie est réparti entre l'acier et le laitier au prorata de leur valeur économique) ou la méthode 50/50 (le bénéfice est partagé à égalité afin de favoriser un équilibre entre offre et demande).

La quantification des impacts environnementaux associés aux matériaux diffère selon la méthode d'allocation, les résultats peuvent être significativement modifiés au point de changer l'ordre de préconisation des matériaux étudiés (Nicholson et al., 2009). Les allocations de fin de vie peuvent être réparties à différentes échelles. Un schéma de cascade impliquant trois cycles de vie d'un produit est présenté à la Figure 1-4 (Ekvall et Tillman, 1997). Le procédé multifonction de recyclage R1 gère les déchets du produit P1 et fournit le matériau pour le produit P2. Le système multifonction de cycle de vie du produit P2 traite les déchets de P1, assure la fonction du produit P2 et apporte le matériau résultant pour P3. Enfin, la cascade de cycle de vie rassemble l'ensemble des fonctions de tous les produits sur tous les cycles de vie. La définition du cadre de l'étude nécessite de choisir une méthode d'allocation unique pour l'ensemble du projet, qui peut se baser sur les méthodes suivantes. La méthode **des stocks** (**cut-off** en anglais) (Ekvall et Tillman, 1997) associe aux produits uniquement les impacts directement liés à ceux-ci. Ainsi, les impacts liés au recyclage sont pris en compte seulement s'il a été effectué en phase amont. Les impacts du recyclage en fin de vie d'un produit sont attribués au cycle de vie du produit résultant. Cette méthode repose sur le fait que les hypothèses du taux de recyclage correspondent à un futur lointain, lors de la fin de vie du bâtiment, elles sont alors incertaines. Dans le cas d'un projet de conception de bâtiment, la méthode cut-off attribue donc les bénéfices du recyclage au bâtiment concerné uniquement si les matériaux de construction résultent d'un procédé de recyclage. Cette prise de position n'incite cependant pas les constructeurs à recycler leurs matériaux en fin de vie, car aucun bénéfice n'y sera associé. La méthode relative à la **qualité du matériau** (Ekvall et Tillman, 1997) (ou « perte de qualité ») prend en compte la dégradation que peut subir le matériau d'origine, et donc l'amélioration nécessaire pour obtenir de nouveau la fonction initiale. La méthode en **boucle fermée** considère que chaque produit est responsable des impacts environnementaux induits par la production

des matières premières, le recyclage et le traitement des déchets finaux de manière uniforme. L'impact est donc une moyenne, répartie de manière égale entre les produits en fonction du nombre de fois où le recyclage intervient au cours du cycle de vie.

La **méthode 50/50** (European Commission et al., 2012) attribue équitablement les bénéfices du recyclage en amont et en aval du cycle de vie. Cette méthode permet de valoriser les différents acteurs du processus du recyclage, tout en évitant le double comptage. En effet, l'impact positif du recyclage ne doit être compté qu'une fois, et doit être réparti entre le bâtiment étudié, le bâtiment d'où provient le matériau à recycler, et le bâtiment dans lequel le matériau recyclé va être installé. Enfin, la méthode de substitution attribue un impact environnemental égal à chaque cycle de vie de la cascade, qui correspond à l'impact du matériau neuf nécessaire pour remplacer la perte au cours du procédé de recyclage.

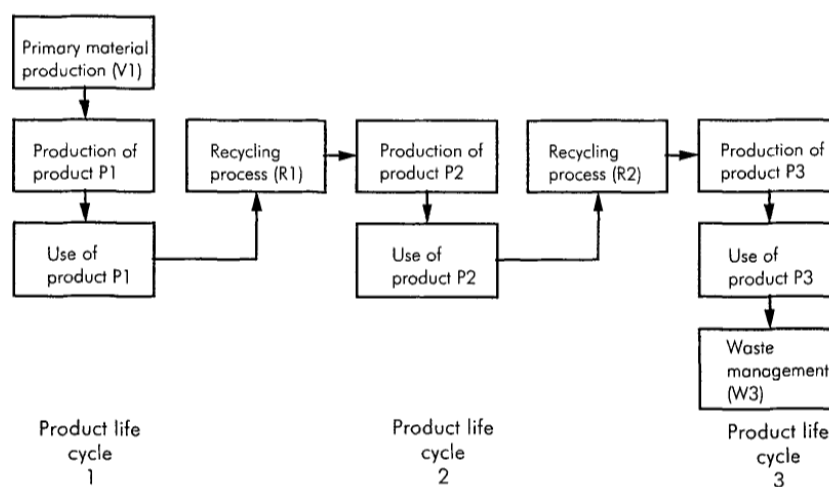


Figure 1-4 : Cascade de cycle de vie impliquant trois cycles de vie d'un produit séparés par des procédés de recyclage (Ekvall and Tillman 1997)

❖ Choix entre ACV attributionnelle ou conséquentielle

L'approche attributionnelle vise à quantifier la part des impacts environnementaux alloués aux activités qui ont contribué à la conception, à l'utilisation et à l'élimination du produit. L'objectif de la modélisation attributionnelle est d'identifier l'origine des impacts d'un aspect spécifique d'un produit, et d'associer les impacts correspondants aux procédés qui ont contribué à son cycle de vie. L'utilisation de données moyennes des fournisseurs du marché est alors pertinente, données réparties selon une règle d'attribution définie. L'approche conséquentielle quant à elle prend en compte les impacts de la totalité des activités qui engendrent un changement lors de la production, de la consommation et de l'élimination du produit. Cette approche montre les conséquences de la décision d'utiliser le produit en temps réel, il est donc pertinent d'utiliser les données marginales et la substitution des activités modifiées. Dans un objectif d'écoconception, l'approche conséquentielle semble plus appropriée car il s'agit de prendre en compte les conséquences des choix de conception en incluant les effets induits au-delà du bâtiment

étudié. En particulier, un bâtiment influence le système électrique en contribuant à la variation de la demande, avec par exemple une pointe de consommation lors des journées froides d'hiver si l'électricité est choisie pour alimenter le chauffage. La majorité des ACV sont effectuées dans le but de proposer une aide à la décision impliquant un choix entre deux produits ou la substitution de l'un au bénéfice de l'autre afin d'améliorer la performance environnementale du système mis en place. Cet objectif implique des comparaisons de variantes dans le contexte précis du projet, et lorsqu'il s'agit d'une production qui n'implique pas de changement, la comparaison des variantes se fait entre la fabrication, l'utilisation et l'élimination du produit par rapport à l'absence de production. Cette approche correspond à l'ACV conséquentielle. La comparaison entre les différents fournisseurs peut également être traitée de manière conséquentielle, car elle prend en compte les impacts du produit choisi et la baisse de production du concurrent. Pour ces raisons, la pertinence de l'approche attributionnelle s'est posée (Weidema, 1998).

L'approche conséquentielle reflète les causalités physiques et monétaires, les résultats mettent en évidence la différence d'impact causée par la réalisation de l'unité fonctionnelle avec l'un ou l'autre produit, tout en soustrayant les résultats pour le produit non choisi. L'ACV conséquentielle permet d'estimer l'influence des activités entre elles ainsi que leur influence sur l'environnement. Elle consiste à identifier les conséquences des actions passées et futures, mais suit un modèle homogène, linéaire et statique, pour lequel chaque procédé est pris en compte à un moment donné. L'approche se focalise sur les changements dans le contexte actuel, et s'appuie sur les changements analysés dans le passé récent. Elle est donc particulièrement pertinente si les changements du contexte actuel et du futur proche peuvent s'apparenter aux changements du passé récent. Pour modéliser les changements d'un avenir plus lointain, des scénarios prospectifs peuvent être intégrés pour mieux refléter les impacts des futurs changements induits par les activités qui se déroulent dans le contexte actuel. Selon Guinée et al. (2001), tous les systèmes de produits sont étroitement liés, l'ACV attributionnelle présente un système homogène qui ne reflète pas la réalité, car de nombreux échanges existent entre le système et son environnement, mais aussi entre les différents procédés du système. Ces derniers ne sont pris en compte que dans le cas d'une ACV conséquentielle (Guinée et al., 2001). Enfin, l'ACV conséquentielle comprend de très grandes incertitudes relatives aux nombreuses données nécessaires et au fait que les connaissances actuelles sont utilisées pour quantifier les conséquences futures. Cependant elles peuvent être estimées et contrôlées, contrairement aux incertitudes de l'ACV attributionnelle qui sont inévitables et incontrôlables, compte tenu de l'utilisation de données moyennes plutôt que marginales. Selon Weidema (2003), l'approche conséquentielle est la plus appropriée pour prendre une décision spécifique au contexte étudié.

L'approche attributionnelle utilise des règles d'allocation normées pour isoler le système de produits étudié. Elle présente l'allocation de la responsabilité des actions passées et futures, qui est nécessaire dans la question juridique de l'attribution de la culpabilité. Elle est alors particulièrement utile en phase amont des projets, alors que la faible quantité de données accessibles handicape la réalisation d'une

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

ACV conséquentielle. Tillman (2000) relève la pertinence de l'ACV attributionnelle dans de nombreuses situations. Tout d'abord cette approche semble plus simple car elle nécessite uniquement les données propres au système, et non celles des autres produits. Elle serait donc utile pour une introduction pédagogique à l'ACV, mais aussi pour l'identification des procédés du système ayant le plus d'influence. Cette approche pourrait également être plus adaptée pour les déclarations environnementales de produits, car de nombreuses règles normées doivent être définies et respectées pour appliquer l'ACV des éléments et permettre leur comparaison. L'addition des impacts bruts aux impacts déjà comptabilisés semblent plus simple avec une approche attributionnelle, par exemple ajouter l'impact du traitement d'un produit à celui donné par les fournisseurs. Cependant selon Weidema (2003), ces deux derniers points peuvent aussi être traités dans le cadre d'une ACV conséquentielle. D'autre part, l'ACV attributionnelle permet d'évaluer les impacts lorsqu'aucun changement n'est impliqué, pour identifier les priorités par exemple, ou lorsque les produits substitués sont inconnus. L'approche conséquentielle permet également d'évaluer les impacts dans ce cas, mais uniquement si les quantités sont faibles. Pour des quantités plus importantes, il est nécessaire d'inclure toute influence sur les conditions aux limites (Weidema, 2003). Un autre avantage de l'ACV attributionnelle est le temps limité nécessaire à la collecte des données, étant donné qu'il suffit de les collecter auprès des interlocuteurs directs, intervenant dans le cycle de vie du système étudié, les frontières du système étant limitées.

❖ Implications du choix entre ACV attributionnelle et conséquentielle, exemple du mix de production d'électricité

Le mix de production d'électricité dépend de l'approche qui a été choisie : dans le cadre d'une ACV attributionnelle un mix moyen est considéré, tandis que l'approche conséquentielle utilise des données correspondant au mix marginal de production électrique. Le choix de l'approche de modélisation a une grande influence sur les impacts environnementaux d'un projet (Frischknecht et Stucki, 2010). Les données marginales du mix électrique utilisées dans le cadre de l'ACV conséquentielle prennent en compte par exemple la conséquence de la décision de construire un bâtiment, et donc la demande supplémentaire induite par ce bâtiment sur le réseau électrique. Cela peut se traduire par la nécessité de faire fonctionner un moyen de production disponible, ou au contraire de réduire la production d'électricité du réseau si un système photovoltaïque est installé ou si le bâtiment est rénové. Dans ce cas, la diminution de la demande intrinsèque au réseau évite une production correspondant au mix marginal (c'est la production la plus onéreuse que le gestionnaire du réseau évite d'acheter en cas de réduction de la demande, et dans le cas contraire c'est la technologie disponible la moins chère qui sera mobilisée), généralement très carboné car les technologies disponibles correspondent souvent aux productions d'énergie fossiles. Un exemple de mix marginal annuel est illustré Figure 1-5 pour une demande supplémentaire constante entre 10 W et 1 MW. L'hydraulique modulable n'intervient pas car la quantité produite peut éventuellement être « déplacée » mais ne peut être augmentée ; la production provenant du turbinage des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) ne participe pas non plus

au mix marginal. L'essentiel de la demande marginale est fourni par les centrales de charbon et de gaz, et en heure creuse le nucléaire est disponible à hauteur d'environ 30 % sur l'année entière pour satisfaire une demande supplémentaire. Les technologies de pointe ne sont utilisées que si les centrales de charbon et de gaz sont saturées (Roux, 2016).

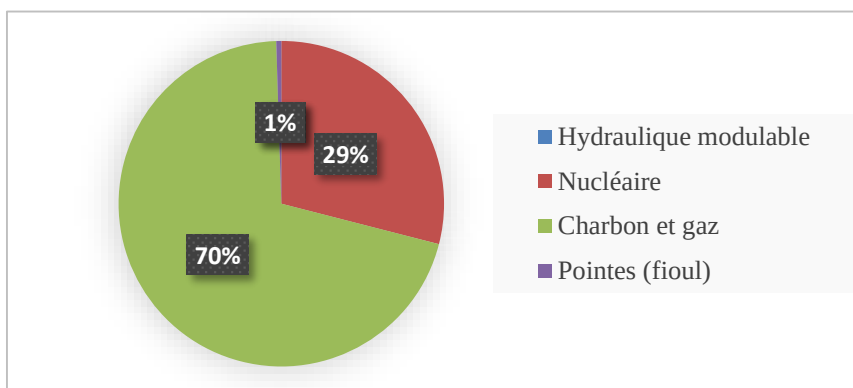


Figure 1-5 : Proportion des technologies de production d'électricité intervenant dans le mix marginal annuel de 2013, d'après (Roux, 2016)

Une méthode de modélisation courante en ACV conséquentielle consiste à identifier la technologie concernée par un changement de capacité à long terme et de faire l'hypothèse que la production marginale provient uniquement de cette technologie (Ekvall et Weidema, 2004). Or, le changement de capacité marginal va s'effectuer sur un ensemble de technologies qu'il serait pertinent d'inclure dans la modélisation du mix marginal. En effet, la demande de chaleur et d'électricité varie au cours du temps, en fonction des saisons, des jours de la semaine et des heures de la journée. Des modèles ont alors émergé dans la littérature pour prendre en compte l'aspect temporel, notamment en créant un modèle déterminant une moyenne de la production marginale annuelle prenant en compte les variations de la demande et de la production d'électricité provenant par exemple de l'énergie éolienne (Lund et al., 2010). Roux (2016) souligne la nécessité d'un modèle adapté aux bâtiments et aux quartiers assurant une cohérence entre les données spécifiques à la gestion du mix et celles propres à l'étude des bâtiments (données météorologiques, consommation de référence etc.). Un modèle de mix électrique a alors été généré dans un contexte français, permettant d'associer à chaque heure de l'année la part des technologies produisant de l'électricité selon la demande, dépendante des conditions météorologiques (Roux, 2016). Par rapport à l'utilisation d'un mix moyen annuel, ce modèle permet d'affiner le calcul des impacts environnementaux associés aux consommations d'électricité évaluées heure par heure sur une année.

❖ Horizon temporel

Les impacts environnementaux d'un bâtiment ne sont pas constants au cours du temps ; il serait intéressant de connaître le profil des différents impacts au cours de la fabrication des matériaux, de l'utilisation du bâtiment, de la rénovation et de la fin de vie du bâtiment. L'évaluation d'un modèle

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

utilisant un inventaire de cycle de vie dépendant au temps semble être impossible car trop coûteuse en temps de calcul (Tiruta-Barna et al., 2016). D'autre part, il serait utile uniquement si les émissions variaient de manière significative au cours du temps, par exemple en fonction des conditions extérieures ; certains procédés pourraient faire l'objet d'une étude en ce sens. Etant donné qu'il existe de nombreuses variations temporelles dans le cycle de vie d'un bâtiment, il peut être judicieux d'identifier les aspects les plus influents pour trouver un compromis entre précision des résultats et faisabilité technique de l'ACV. Par exemple, la production de modules photovoltaïques a bénéficié d'améliorations permettant de réduire fortement ses impacts (Besseau, 2019) et la perspective d'une production en Europe pourrait être considérée. De même, l'évolution au cours des années du mix de production d'électricité peut influencer les impacts de fabrication de certains produits.

L'importance des impacts selon leur année d'émission peut être questionnée en fonction de l'objectif de l'ACV. Différentes méthodes de calcul des émissions de gaz à effet de serre sont dès à présent proposées pour prendre en compte l'impact des émissions sur le long terme. Les indicateurs préconisés par le GIEC sont considérés avec un horizon temporel glissant ; une période d'émission est définie, identique pour chaque substance, nommée horizon temporel de l'impact ; l'impact correspond alors à l'intégrale de la courbe de dégradation de la substance au cours de l'horizon temporel de l'impact (Ventura, 2022). Par exemple, le potentiel de réchauffement global GWP100 intègre l'émission sur les 100 années suivantes. La réglementation RE2020 propose une méthode dite « dynamique simplifiée » du calcul des émissions de GES, qui considère un horizon temporel fixe de 100 ans après la construction du bâtiment. Selon cette méthode, un kg de CO₂ émis dans 50 ans aura moins d'impact qu'un kg émis aujourd'hui. Cette méthode ne fait pas l'unanimité dans la communauté scientifique car elle ne respecte pas les principes fondamentaux de l'ACV qui reposent sur la comptabilisation de tous les flux provenant et émis vers l'environnement et le même horizon temporel glissant pour chaque substance quelle que soit la date d'émission.

L'évolution de la demande énergétique varie également selon les années ; le vieillissement du bâtiment diminue la résistance thermique des isolants donc les besoins de chauffage augmentent, la performance des panneaux photovoltaïques diminue également au cours du temps, ce qui augmente la demande en énergie, et au contraire certains appareils peuvent être remplacés par des appareils plus performants et ainsi diminuer la demande énergétique. De plus, le mix énergétique dépend fortement des décisions politiques futures, notamment des technologies qui vont être développées de manière privilégiée. Pour prendre en compte correctement cette évolution temporelle il est possible de se tourner vers l'approche prospective en ACV, qui est principalement mise en pratique par l'utilisation de scénarios (Frossard, 2020). D'autre part, le mix de production d'électricité évolue également au cours du temps, des scénarios prospectifs d'évolution du mix peuvent être établis pour évaluer les étapes d'utilisation, de rénovation et de fin de vie qui vont se dérouler au cours des 100 prochaines années (Frapin et al., 2022).

❖ Influence des transports

Selon l'Ademe, le secteur des transports représentait 33 % de la consommation d'énergie finale en France en 2015, et 39 % des émissions de gaz à effet de serre. Ces chiffres alertent et permettent une prise de conscience qui est accompagnée par une évolution du cadre législatif ; de nombreuses lignes de transport en commun sont développées en région parisienne, l'extension des lignes à grande vitesse est prévue en France ainsi que l'amélioration de l'intermodalité. L'impact des transports est tel qu'il n'est pas négligeable par rapport aux impacts du bâtiment.

Lors de la réalisation d'une ACV ayant pour objectif l'aide à la conception d'un projet de bâtiments, l'impact environnemental des transports est rarement pris en compte. Cependant, selon l'échelle et la problématique du projet, les impacts relatifs au transport peuvent faire partie des données nécessaires à la prise de décision, par exemple lorsque l'emplacement du projet est encore à l'étude. Les transports en communs et la mobilité douce sont à privilégier par rapport à l'utilisation de la voiture individuelle, les impacts sur l'environnement étant moindres. Cependant, de nombreux facteurs incitent les usagers des quartiers à utiliser la voiture : par exemple la fréquence, la ponctualité, l'intermodalité, le coût et la propreté des transports en commun (de Oña et al., 2021). Cette même étude indique également que les raisons de l'utilisation de la voiture au détriment des transports en commun dans cinq capitales européennes dépendent également, dans une seconde mesure, des aspects relatifs aux heures de service, de la proximité, de la vitesse, de la température et de la sécurité.

Les transports peuvent être pris en compte selon différentes approches de modélisation, par exemple dans une approche attributionnelle, conséquentielle à l'échelle du quartier, ou encore conséquentielle à l'échelle du territoire. Roux (2016) a mené une étude conséquentielle sur l'utilisation de la voiture individuelle suite à l'implémentation d'un quartier comprenant trois îlots de bureaux et quatre îlots de bâtiments d'habitation en région parisienne. Une variante considérant une mixité d'usage a été analysée ; la variante de base situait les bâtiments de bureaux proches des transports en communs, et dans la variante mixte, les logements, les bureaux et les commerces sont répartis dans le quartier afin que chaque bâtiment intègre les trois usages. L'augmentation de la distance annuelle parcourue en voiture a alors été estimée à 7 % du fait de l'éloignement entre les bureaux et les transports en commun. Une autre variante optimisant l'emplacement des différents usages au sein des bâtiments, notamment situant les bureaux dans les espaces inférieurs, à l'ombre, a permis de diminuer de 8,8 % les besoins de climatisation. Cette étude montre l'importance de l'optimisation du zonage du plan masse, car il influence conjointement la performance énergétique des bâtiments et la mobilité des usagers du quartier.

❖ Influence de la structure

Comme mentionné précédemment, les décisions importantes doivent être prises lorsqu'un changement conséquent n'est pas encore trop coûteux, en argent et en temps. L'évaluation environnementale des bâtiments pour l'aide à la conception doit donc être effectuée en phase amont,

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

lorsque le concept architectural est encore flexible ; ce dernier comprend la définition du nombre d'étages, de l'orientation, la géométrie du bâtiment et sa structure (Hollberg et Ruth, 2016 ; Lotteau et al., 2015). Or la quantification des matériaux de la structure nécessite des études précises de qualité du sol, et de connaître le mode de construction, les matériaux employés, l'aménagement intérieur etc. On observe donc un manque d'outils permettant d'estimer un ordre de grandeur des quantités de matériaux dus à la structure. Une étude portant sur 200 bâtiments existants a montré que les quantités de matériaux structurels pouvaient varier entre 200 kg/m² et 1800 kg/m², et que les émissions de GES associées étaient comprises entre 150 et 600 kg CO₂eq./m² (De Wolf et al., 2016).

Les quantités de matériaux structurels sont généralement surdimensionnées afin d'assurer une fiabilité élevée. La littérature s'intéresse à des nouvelles méthodes assurant un compromis entre la fiabilité des structures et la réduction des impacts provenant de l'utilisation des matières premières, comme par exemple les structures porteuses adaptatives (Ostertag et al., 2020). Les avantages des structures bois et béton sont également étudiés, les impacts environnementaux des structures bois étant généralement plus faibles que les impacts des structures béton (Abolghassem Tehrani et Froese, 2017).

❖ Choix des indicateurs environnementaux

Les indicateurs environnementaux sont calculés lors de l'étape d'évaluation des impacts de la méthode d'analyse de cycle de vie définie par la norme ISO 14044. Tous les flux recensés lors de la phase d'inventaire sont agrégés sous la forme d'indicateurs environnementaux afin d'être interprétés.

Des recommandations ont été publiées par l'ILCD, et des travaux récents ont permis de déterminer des méthodes concernant la différenciation spatio-temporelle des impacts. Dans l'objectif d'éviter les transferts d'impact et donc d'aborder un ensemble de problématiques environnementales, un jeu de douze indicateurs a été sélectionné et présenté lors d'un séminaire associant des spécialistes internationaux de l'ACV (les méthodes utilisées seront détaillées dans la suite de ce chapitre) :

- la demande cumulative d'énergie – évaluation de la consommation d'énergie primaire du projet [kWh] ;
- le potentiel de réchauffement global – évaluation de l'effet des gaz à effet de serre sur le forçage radiatif [kgCO₂] ;
- l'eau utilisée – évaluation de la quantité d'eau consommée [m³] ;
- les déchets produits – évaluation de la quantité de déchets inertes produits [t] ;
- les déchets radioactifs – évaluation de la quantité de déchets produits par la production d'électricité nucléaire (cet indicateur permet de réduire les risques dus à la radioactivité) [dm³] ;
- les dommages sur la santé humaine – effet des émissions de substances toxiques sur la santé [DALYs] ;
- les dommages sur la biodiversité – effet des émissions de substances toxiques sur la biodiversité [PDF.m².an] ;

- l'épuisement des ressources abiotiques – évaluation de l'épuisement et de la rareté des minéraux et des ressources fossiles dans le but de préserver les matières premières [kg Sb eq.] ;
- l'occupation des sols - impact de la transformation et de l'utilisation des sols sur la qualité de la terre et des écosystèmes [m².an] ;
- l'acidification – contribution au phénomène de pluies acides et au dépérissement des forêts dû aux émissions de composés d'azote et de soufre (cet indicateur vise ainsi à protéger la faune et la flore) [kg SO₂ eq.] ;
- l'eutrophisation - modification des environnements aquatiques par les émissions excessives de substances azotées et phosphatées (Ces émissions portent atteinte à la biodiversité, cet indicateur environnemental vise à protéger les lacs et les rivières) [kg PO₄ eq.] ;
- la production d'ozone photochimique – impact de l'ozone sur la santé, problèmes relatifs aux voies respiratoires (cet indicateur est pris en compte pour l'amélioration de la qualité de l'air extérieur) [kg C₂H₄ eq].

1.2.3 Inventaire

1.2.3.1 Bases de données

Lors de la réalisation d'une ACV, l'étape suivant la définition de l'objectif et du cadre de l'étude est l'inventaire de cycle de vie. L'inventaire permet de quantifier les substances extraites ou émises vers l'environnement. Il s'agit de prendre en compte les flux entrants et sortants du système soit l'ensemble des émissions dans l'air, l'eau et le sol en prenant en compte les différents procédés amonts tels que l'extraction et le transport de l'énergie et des matières premières, et avals, dont le traitement des déchets. Deux bases de données environnementales sont présentées ici : INIES, alimentée par les fournisseurs et adaptée à un contexte français, et ecoinvent, base de données internationale.

La base de données française INIES contient des fiches de matériaux de construction et d'équipements renseignées par les fabricants ou les syndicats professionnels. Les données sont adaptées au domaine de la construction de bâtiment dans un contexte français. Chaque fiche environnementale inclut des indicateurs environnementaux pouvant être évalués sur la base de plusieurs centaines de flux (un minimum de 168 étant imposé). Cette base de données est notamment utilisée pour la déclaration environnementale des produits, dans le cadre de la réglementation environnementale RE2020. Les limites principales de la base de données INIES reposent sur le manque de données correspondant à l'étape d'utilisation des bâtiments, leur fiabilité étant donnée que de nombreux flux ne sont pas pris en compte dans la base (ce qui ne permet pas d'évaluer correctement les impacts en termes de biodiversité et de santé), et l'aspect subjectif que peut impliquer le renseignement des données par le fabricant.

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

La base de données internationale ecoinvent répertorie environ 4000 flux élémentaires et permet une approche globale, en proposant environ 18 000 produits et services, de nombreux secteurs d'activité différents (Ecoinvent, 2010). Les fiches environnementales comprennent généralement des moyennes européennes, mais s'étendent depuis peu à des données du monde entier ; ecoinvent est continuellement améliorée, la version 3 a été commercialisée en 2013. De nombreuses améliorations techniques et méthodologiques ont été implémentées, mettant à jour les jeux de données afin de proposer une approche actualisée et globale, adaptable aux problématiques régionales et permettant l'utilisation de différentes méthodologies (Wernet et al., 2016). Un modèle conséquentiel a été mis en place, des mix énergétiques régionaux ont été ajoutés afin de contextualiser les données aux régions concernées et ainsi proposer une base de donnée mondiale, une évolution significative par rapport aux versions 1 et 2 qui recensaient principalement des données européennes. La base de données a été actualisée quatre fois entre 2013, la sortie de la version 3, et 2017. De nombreuses données relatives au transport réfrigéré, à l'agriculture, à l'approvisionnement de gaz naturel en Europe, aux produits chimiques et au recyclage du plastique ont été ajoutées. En outre, ecoinvent contient désormais les prix des produits, la méthode ILCD, et le secteur de l'électricité a été mis à jour notamment en ajoutant des mix énergétiques correspondant aux modèles attributionnels et conséquents.

Depuis 2018 la base de données ecoinvent continue d'évoluer, mais les nouveautés ne seront pas implémentées dans cette thèse. Il s'agit de nouveautés et d'améliorations dans de nombreux domaines, tels que le traitement des déchets, l'approvisionnement en eau, les bâtiments et matériaux de construction, le tourisme et les transports. Les données d'électricité, notamment relatives aux mix électriques régionaux sont constamment actualisées, et de nombreux jeux de données sont ajoutés à chaque mise à jour de la base de données.

1.2.3.2 Contextualisation des données

La régionalisation, ou contextualisation, consiste à adapter les procédés en fonction de l'endroit dans lequel ils sont mis en place, pour connaître leur impact réel. Ce concept est particulièrement utile en ACV du fait de la couverture internationale des sites de production et des chaînes d'approvisionnement. Les règles et les exigences sont souvent très différentes d'un pays à l'autre, et le développement du marché des entreprises multinationales peut faire varier les technologies de production régionales de manière significative (Baitz et al., 2013). La régionalisation consiste *a minima* à adapter les données du procédé au mix énergétique du pays dans lequel il est réalisé. Il s'agit par exemple de remplacer un mix européen d'une fiche environnementale par un mix français. Pour plus de précision, la prise en compte des procédés amonts peut être adaptée aux données régionales, et le suivi d'une collecte des données constructeurs et de leur validation par rapport aux réseaux locaux pourrait être effectué. La contextualisation nécessite une base de données d'inventaire régionalisée fréquemment actualisée du fait de son aspect dynamique qui fluctue autant que les marchés. Lu et al. (2019) soulignent

que la recherche s'est d'abord concentrée sur les pays développés, les bases de données régionales nécessitent d'être alimentées pour l'ensemble du globe.

Pour que l'ACV réponde à ses objectifs d'aide à la décision et permette de bien comprendre le système, l'application de la méthode nécessite d'être la plus précise possible, et pour cela les incertitudes doivent être limitées. Patouillard et al. (2020) ont montré que les facteurs de caractérisation contribuaient de manière significative à l'incertitude spatiale, les facteurs de caractérisation régionalisée doivent donc être encore améliorés, et le développement des outils adaptés à la spatialisation est également nécessaire (Patouillard et al., 2020).

Enfin, les systèmes de production et de stockage d'énergie présentent une très forte variabilité technologique, spatiale et temporelle. Un modèle paramétré d'inventaire de cycle de vie relatif à l'énergie éolienne a mis en évidence la réduction d'un facteur trois de l'empreinte carbone de l'éolien entre 1980 et 2030. L'application du modèle à un système photovoltaïque montre une réduction de l'empreinte carbone du même ordre de grandeur. Une des raisons de cette réduction est l'amélioration des performances des composants du système et des procédés de fabrication (Besseau, 2019). Ainsi, l'actualisation des données d'inventaire est nécessaire pour fournir une évaluation environnementale représentative de la réalité et ainsi ne pas nuire à tort à des systèmes en pleine expansion et nécessaires à la transition environnementale tels que le photovoltaïque et l'éolien.

1.2.4 Méthode de caractérisation

1.2.4.1 Généralités

Les phénomènes environnementaux tels que le réchauffement climatique, les pluies acides, ou encore l'appauvrissement de la couche d'ozone sont induits par l'émission de substances vers l'environnement, qui peuvent être classées par catégorie d'impact afin de quantifier le phénomène à travers un indicateur environnemental (Peuportier, 2008). Ce processus est traduit par un modèle de caractérisation, qui relie les substances émises vers l'environnement aux indicateurs d'impacts environnementaux, calculés à partir d'un facteur de caractérisation. Les catégories d'impacts contribuent à trois aires de protection communément admises en ACV : la santé humaine, la biodiversité, et la disponibilité des ressources.

Au sein des catégories d'impacts se distinguent des effets intermédiaires nommés *midpoint* qui décrivent l'intensité d'un phénomène environnemental. Les indicateurs *midpoint* traduisent les flux agissant sur les phénomènes environnementaux par l'émission équivalente d'une substance de référence. Cette catégorie d'indicateurs est plus précise que les indicateurs endpoints (cf. § suivant), car ils se focalisent sur un problème et non sur ses conséquences qui sont plus incertaines. L'indicateur *midpoint* est ainsi un intermédiaire de la chaîne de cause à effet.

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

D'autres indicateurs traduisent un potentiel dommage correspondant aux trois aires de protection, ils relatent un phénomène en aval de la chaîne de cause à effet. Ce sont les indicateurs de niveau *endpoint*, représentés par les dommages à la santé humaine, les dommages à la biodiversité et la raréfaction des ressources. Certains phénomènes intermédiaires, représentés par les indicateurs *midpoints*, sont alloués aux potentiels dommages auxquels ils contribuent, ainsi le phénomène ne sera plus exprimé en émission équivalent de substance émise, mais en potentiel dommage, comme le nombre d'années de vie en bonne santé perdues, pour l'aire de protection des dommages à la santé humaine, ou la proportion d'espèces disparues sur un territoire et une période donnée, pour les dommages à la biodiversité. Ce mécanisme d'évaluation est illustré Figure 1-6. Un indicateur orienté dommage (*endpoint*) est global, il comprend de nombreux phénomènes environnementaux, ce qui implique également une baisse de précision par rapport aux indicateurs de niveau *midpoint*, mais une meilleure représentativité des enjeux environnementaux.

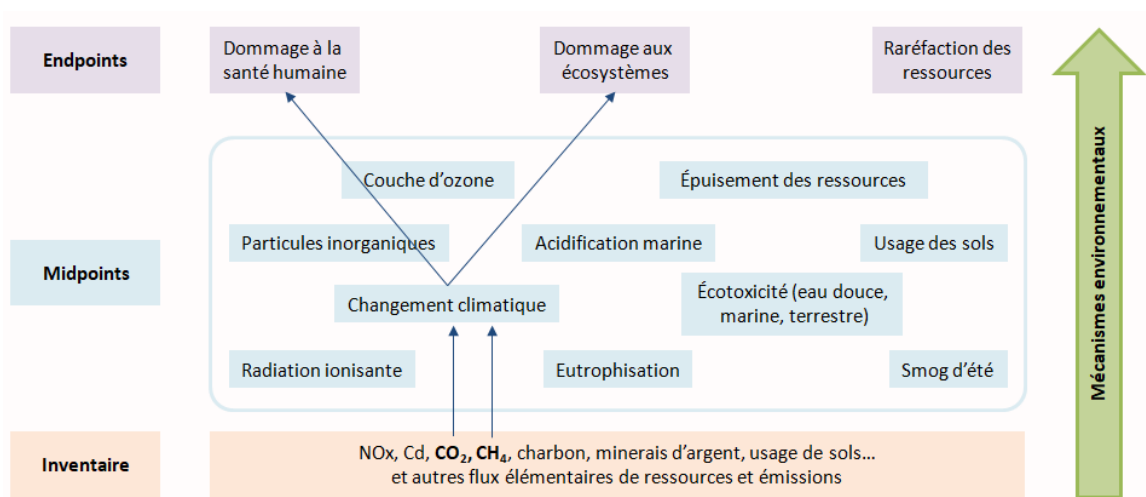


Figure 1-6 : Illustration de la caractérisation des impacts au niveau midpoint et endpoint à partir de l'inventaire (Frossard et Peuportier, 2021)

La définition des différents indicateurs environnementaux permet à l'ACV de répondre à l'une de ses principales fonctions qui est l'aide à la décision. Les parties prenantes ont besoin d'outils leur permettant une compréhension rapide et globale des enjeux concernant les projets sur lesquels ils interviennent, tout en évitant le double comptage des impacts. Pour cela, il est important de différencier les indicateurs midpoint et endpoint, qui peuvent traduire le même phénomène environnemental à une échelle différente. Les indicateurs midpoint et endpoint sont calculés à partir de méthodes de caractérisation, ce sont des indicateurs d'impact environnemental. Il existe une autre catégorie d'impact qui représente les flux, notamment les quantités de déchets émis, ou la demande d'énergie primaire. Ces flux apportent un complément à l'aide à la décision, car ils sont utilisés comme référence par de nombreux professionnels. Il convient toutefois de différencier ces catégories lors de l'interprétation des résultats pour éviter le double comptage.

1.2.4.2 Les méthodes existantes

Plusieurs méthodes de caractérisation et jeux d'indicateurs existent, l'utilisateur doit alors choisir parmi les données accessibles en vue de répondre au mieux au cadre de l'étude. L'ILCD relève la nécessité de l'exhaustivité des données prises en compte dans un modèle, sa pertinence environnementale dont l'actualisation des données, sa facilité d'utilisation, la prise en compte des incertitudes pour maximiser la robustesse du modèle ainsi que le libre accès des données (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010). Trois méthodologies récentes correspondant à ces critères sont présentées ci-après.

Environmental footprint 2.0 est une méthodologie reconnue à l'échelle européenne car elle est à l'initiative de la commission européenne. Cet ensemble de méthodes d'évaluation des impacts environnementaux basées sur les recommandations de l'ILCD a tout d'abord été publié en 2013, puis deux actualisations ont vu le jour, dont la première a été implémentée par ecoinvent en 2018.

IMPACT World+ est une méthode globale régionalisée pour l'évaluation de l'impact du cycle de vie (Bulle et al., 2019). Cette méthode récente instaure les niveaux *midpoint* et *endpoint*, propose des données régionalisées, et toutes les catégories d'impacts à long terme sont divisées entre des dommages à court terme (durant les 100 années après l'émission) et des dommages à long terme. Le changement climatique est représenté au niveau *midpoint* par deux indicateurs, le potentiel de réchauffement climatique reflétant les effets à court terme (GWP100), et les potentiels de température globale (GTP100) correspondant aux impacts à long terme du changement climatique au niveau *midpoint*. Au niveau *endpoint*, des indicateurs orientés dommages sont également différenciés entre les dommages à court et à long terme. Bulle et al. (2019) montrent la contribution dominante du changement climatique et des effets respiratoires sur les dommages à la santé, et la contribution dominante du changement climatique et de l'usage des sols sur les dommages aux écosystèmes. Enfin, une particularité d'IMPACT World+ par rapport aux autres méthodologies récentes repose sur l'intégration de nouveaux indicateurs, tels que les impacts de la consommation d'eau sur la santé humaine, et les impacts long terme d'acidification marine sur la qualité des écosystèmes. La contribution de ces derniers est significative sur les potentiels dommages.

ReCiPe est également une méthode pour l'évaluation des impacts du cycle de vie, elle a été implémentée en 2008 et mise à jour en 2016 (Goedkoop et al., 2013 ; Huijbregts et al., 2017). Cette méthode permet de convertir des données provenant de l'inventaire de cycle de vie vers un nombre limité d'impacts aux niveaux *midpoint* et *endpoint*. Les trois aires de protections sont implémentées ; la santé humaine, la qualité des écosystèmes et la raréfaction des ressources. Les facteurs de caractérisation des indicateurs de niveau *endpoint* proviennent des indicateurs de niveau *midpoint* dont les impacts contribuent aux potentiels dommages. ReCiPe 2016 implémente des données à l'échelle mondiale contrairement à l'échelle européenne proposée dans la version précédente, et a permis d'ajouter des

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

impacts tels que l'utilisation de l'eau sur la santé humaine et sur les écosystèmes ainsi que les impacts du changement climatique et de la formation d'ozone troposphérique sur les écosystèmes. Les méthodes de ReCiPe sont déclinées selon trois horizons temporels : individualiste (20 ans), hiérarchique (100 ans) et égalitaire (500 ans).

1.2.4.3 Le carbone biogénique

La biomasse végétale capte du CO₂ lors de la croissance des plantes, de par la photosynthèse. Ce carbone est appelé « carbone biogénique ». Ainsi, tous les matériaux de construction comprenant du bois pur ou travaillé, ou tout autre forme végétale stockent du carbone tout au long de leur durée de vie. Cependant, tout ou une partie du carbone stocké est rejeté dans l'atmosphère lors de l'élimination du matériau, cette quantité de carbone émise dépend du traitement de fin de vie choisi. Ce phénomène contribue à l'atténuation du réchauffement climatique de façon temporaire, au cours de la vie du matériau.

Dans le but d'éviter un double comptage, si les GES sont émis à un autre moment du cycle de vie, une approche propose de ne pas comptabiliser le carbone biogénique (GIEC, 2006). Une autre approche considère des émissions négatives lors du stockage du carbone grâce à la photosynthèse, et des émissions positives au moment de la fin de vie du matériau, selon le procédé mis en œuvre. Cette hypothèse est plus appropriée car elle permet de ne pas biaiser les résultats qui dépendent fortement du procédé de fin de vie, et représente au mieux les systèmes complexes qui pourraient allouer à différents procédés les émissions négatives et positives (Christensen et al., 2009 ; Guinée et al., 2009). La quantification du carbone biogénique dépend de l'horizon temporel de l'étude.

Afin de prendre en compte de manière réaliste les différentes pratiques d'écoconception, il est proposé de considérer les émissions négatives du stockage du carbone uniquement pour le bois provenant de forêts certifiées, et de comptabiliser les émissions positives en fonction du procédé de fin de vie défini. Ainsi, les éléments provenant de la biomasse végétale ont des impacts faiblement négatifs s'ils sont incinérés, et plus significativement négatifs dans le cas d'une mise en décharge ou de valorisation énergétique. Cette approche conduit à des tendances proches d'une ACV dynamique sur 500 ans (Levasseur et al., 2013).

1.2.5 Interprétation des résultats

L'ACV est utilisée pour communiquer avec les parties prenantes qui ne sont la plupart du temps pas des experts ACV. Les résultats doivent donc être clairs et compréhensibles (Baitz et al., 2013). L'étape d'interprétation des résultats, quatrième étape de la méthode de l'analyse de cycle de vie décrite par la norme ISO 14040, synthétise les résultats de l'inventaire du cycle de vie et de l'analyse d'impacts du

cycle de vie, et propose des recommandations pour l'aide à la décision en accord avec l'objectif et le cadre définis en amont de l'étude. Les objectifs d'une ACV de bâtiment peuvent considérablement varier, par exemple les ACV peuvent viser à identifier les critères les plus influents sur les impacts environnementaux d'un bâtiment, ou comparer différentes variantes de conception (Tam et al., 2022). Dans ces deux cas l'interprétation des résultats comprendra des préconisations mais ces dernières ne se focaliseront pas sur les mêmes éléments.

Les décisions prises par les parties prenantes dépendent de nombreux critères, politiques, économiques, environnementaux, etc. L'aide à la décision fournie par l'ACV des bâtiments est nécessaire, mais la présentation des résultats environnementaux n'est pas suffisante si le décideur n'a pas de référence à laquelle comparer le projet. Une étude a été menée dans le cadre de l'Annexe 72 de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) pour créer des références environnementales à partir d'archétypes de bâtiments, en différenciant les usages (Grabowska et al., 2021). Ainsi, des références françaises sont disponibles pour 12 indicateurs environnementaux afin de comparer les impacts d'un bâtiment avec ceux obtenus dans le cas des meilleures et des pires pratiques, sur le principe de l'étiquette énergétique classant les projets du meilleur (classe A) au pire (classe G).

Enfin, il est nécessaire de préciser que l'ACV, comme toute méthodologie, a ses limites. Seuls les aspects quantifiables de la qualité environnementale sont pris en compte, la méthode n'aborde pas l'esthétique ou la qualité de vie. Si ces critères sont essentiels pour les décideurs, alors il s'agira d'ajouter des méthodes, telles que la prise en compte de la lumière naturelle ou de l'isolation acoustique. De plus, les dommages à la santé humaine sont calculés en DALY, ils correspondent à une moyenne spatiale des polluants et ne dépendent donc pas du lieu d'émission. Pour évaluer les impacts réels, il faudrait inclure la qualité de l'air dans l'analyse, mais cela nécessiterait d'ajouter d'autres catégories de modèles (Peuportier, 2008). Une limite commune à tous les indicateurs est l'imprécision des évaluations, avec une incertitude des données d'inventaire et donc dans l'évaluation des flux de matière et d'énergie ; une incertitude sur les impacts potentiels et enfin sur le passage des effets aux impacts. La durée de vie des bâtiments est également un paramètre incertain en ACV ; il est difficile de prévoir la durée de vie exacte des composants mais également de prévoir l'évolution du mix électrique ou encore des techniques, notamment celles concernant le traitement des déchets qui peut se produire une centaine d'années après la réalisation ou même beaucoup plus (déchets nucléaires).

1.3 Applications de l'écoconception des bâtiments

Nous avons montré dans la partie précédente de ce chapitre que la méthode de l'analyse de cycle de vie était appropriée pour l'écoconception des bâtiments, nous proposons désormais de présenter des exemples d'application de cette méthode aux bâtiments, en présentant notamment une technique

d'optimisation permettant de trouver un compromis pour réduire les impacts environnementaux des projets de conception et de rénovation des bâtiments.

1.3.1 Écoconception assistée par optimisation multicritère

1.3.1.1 Un problème d'optimisation

L'optimisation est une procédure durant laquelle un ensemble de solutions minimisant ou maximisant certains objectifs sont trouvées et comparées jusqu'à ce qu'aucune meilleure solution ne soit trouvée, tout en respectant un ensemble de contraintes (Barichard, 2003). Selon Machairas et al. (2014), une optimisation en conception de bâtiment se compose d'au moins quatre étapes :

- Identifier les variables de décision et les contraintes principales.
- Sélectionner un outil de simulation et créer un modèle du bâtiment.
- Sélectionner les fonctions objectifs appropriées.
- Sélectionner un algorithme d'optimisation adapté

L'optimisation mono-objectif vise à obtenir une solution unique, elle était utilisée dans les débuts des études d'optimisation. Il devient rapidement naturel d'étendre les problèmes d'optimisation à plusieurs objectifs, généralement conflictuels (par exemple en minimisant les coûts de production et en maximisant la productivité). La résolution de ce problème n'apporte alors plus une solution optimale, mais un ensemble de solutions destiné aux différents acteurs du projet qui devront prendre des décisions en acceptant des compromis.

L'optimisation multicritère est appliquée dans de nombreux domaines, tels que la recherche opérationnelle, les mathématiques appliquées, l'analyse numérique, les statistiques, etc. Dans le secteur du bâtiment, des outils d'optimisation de la performance énergétique des bâtiments sont en cours de développement, et commencent à s'étendre à d'autres critères notamment les impacts environnementaux, sociaux et économiques. L'objectif est de proposer une aide à la prise de décision une fois les résultats analysés et exploités, en les présentant simplement aux acteurs des projets.

Un problème d'optimisation multi-objectif comportant M objectifs et $J+K$ contraintes peut être défini comme :

$$\left. \begin{array}{lll} \text{Maximiser/Minimiser} & f_m(x), & m=1,2,\dots,M ; \\ \text{avec} & g_j(x) \geq 0, & j=1,2,\dots,J ; \\ & h_k(x)=0 & k=1,2,\dots,K \end{array} \right\} x \in \Omega$$

où Ω est l'ensemble des solutions réalisables, et donc $F(\Omega)$ est l'espace des objectifs.

Les solutions non dominées forment alors un front. Une solution $x^{(1)}$ domine une solution $x^{(2)}$ au sens de Pareto si et seulement si les conditions suivantes sont vérifiées :

- La solution $x^{(1)}$ est au moins aussi bonne que la solution $x^{(2)}$ sur tous les objectifs ;
- La solution $x^{(1)}$ est strictement meilleure que la solution $x^{(2)}$ sur au moins un objectif.

Le front de Pareto est défini comme l'ensemble des solutions non dominées. La Figure 1-7 illustre la notion de domination au sens de Pareto ; les solutions A et B appartiennent toutes deux au front de Pareto car elles sont non dominées. La solution C quant à elle est dominée au sens de Pareto, elle n'appartient donc pas au front de Pareto.

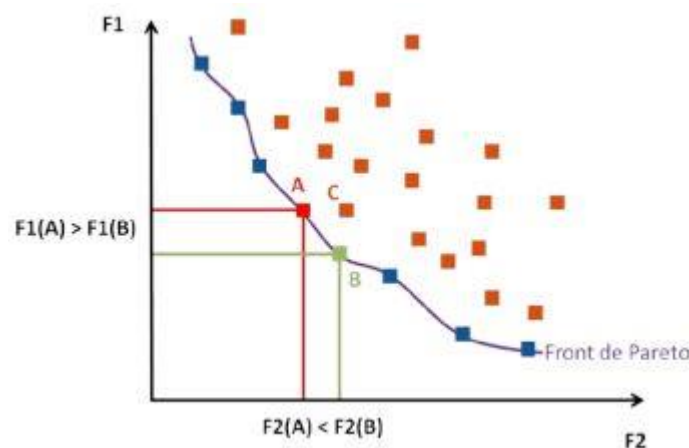


Figure 1-7 : Illustration de la domination au sens de Pareto

1.3.1.1.1 Les méthodes d'optimisation

Les méthodes d'optimisation peuvent être classées en trois catégories (Goldberg, 1989) ; les méthodes énumératives, déterministes et stochastiques. Les méthodes énumératives s'appliquent sur des espaces décisionnels à combinatoire finie. Elles permettent une étude détaillée des interactions mais sont très coûteuses en temps de calcul. Les méthodes déterministes sont initialement conçues pour l'optimisation continue et nécessitent donc des propriétés de continuité et parfois de dérivabilité sur les fonctions objectifs. Elles peuvent cependant échouer face à des minima locaux.

Les méthodes stochastiques quant à elles regroupent l'ensemble des méta-heuristiques dont les algorithmes évolutionnaires. Elles permettent de traiter des problèmes non-linéaires avec des discontinuités, et de trouver un minimum ou maximum global et non local. Les algorithmes génétiques font partie des méthodes stochastiques, et font preuve d'une grande popularité, du fait qu'ils opèrent sur une population de solutions au lieu d'une solution unique. Les algorithmes génétiques sont directement inspirés de la théorie de l'évolution naturelle des espèces qui fait appel à deux mécanismes : la sélection naturelle et la reproduction (Lutton, 2004). Un algorithme génétique initialise en premier lieu une population. Cette étape peut être définie aléatoirement, mais des méthodes d'échantillonnage telles que les séquences de Sobol ou l'hypercube latin peuvent permettre une initialisation de la population plus

représentative de l'espace de décision. L'algorithme fait ensuite intervenir une boucle générationnelle sur ce schéma : la sélection pour reproduction, la reproduction, l'évaluation et la sélection pour le remplacement. Les itérations de la boucle générationnelle sont stoppées lorsque le critère d'arrêt est atteint. Ce dernier est ainsi l'un des paramètres les plus importants de l'optimisation : c'est ce qui permettra à l'algorithme de converger vers l'optimum recherché, ou au contraire qui empêchera cette convergence s'il est prématuré (nombre de générations trop faible). Le principe général de fonctionnement d'un algorithme évolutionnaire est illustré Figure 1-8.

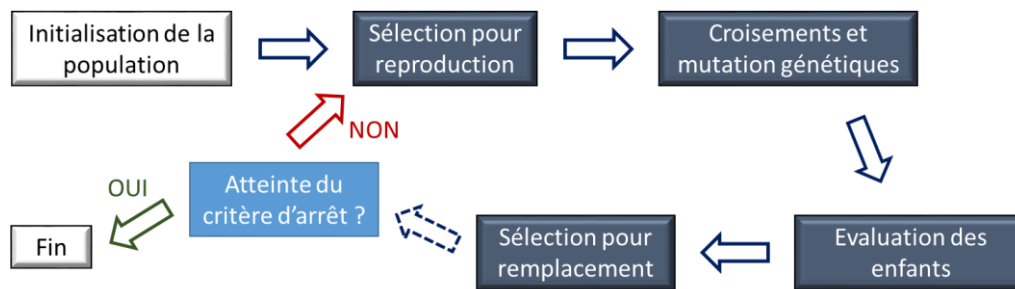


Figure 1-8 : Principe général de fonctionnement des algorithmes génétiques

L'approche multicritère à privilégier est l'optimisation au sens de Pareto (Evins, 2013 ; Attia et al., 2013). Un grand nombre de travaux d'optimisation présents dans la littérature scientifique minimisent les consommations d'énergie et le coût du bâtiment, et on commence à trouver dans la littérature des optimisations basées sur des objectifs environnementaux, en grande majorité les émissions de gaz à effet de serre.

1.3.1.1.2 Les spécificités de l'algorithme

Les algorithmes évolutionnaires sont faciles à implémenter, ne requièrent pas d'informations conséquentes et sont flexibles avec un vaste domaine d'application. Les optimisations mono-objectifs ne nécessitent pas un tel processus, mais pour résoudre les problèmes multi-objectifs, les algorithmes évolutionnaires sont très bien adaptés et renvoient l'ensemble des solutions non dominées sur un front de Pareto (Deb, 2011).

Les algorithmes génétiques permettent une meilleure diversité génétique de la population courante que les simples algorithmes évolutionnaires. En effet, l'information portée par les gènes est représentée par des chaînes de nombres binaires sur lesquels les croisements et mutations peuvent opérer ; les enfants ont la possibilité, par croisement seul, d'être composés d'allèles présents chez aucun de leurs parents (Rivallain, 2013).

L'algorithme évolutionnaire NSGA-II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) développé par Deb et al. (2002) met en œuvre des stratégies élitistes qui ont été démontrées comme particulièrement performantes, tant en terme de qualité des solutions que de description de l'étendue du front de Pareto

(Zitzler, 1999 ; Deb et al., 2000 ; Deb, 2001). De nombreux travaux ont été effectués par la suite pour améliorer l'algorithme NSGA-II, qui ont conduit notamment à l'algorithme NSGA-III (Deb et Jain, 2012). Ces travaux se basent sur la difficulté rencontrée par l'algorithme NSGA-II à atteindre des solutions optimales dans des problèmes à plus de trois objectifs. Cet algorithme récent est très efficace et recommandé pour les optimisations comprenant quatre objectifs ou plus, cependant pour des optimisations de deux objectifs notre choix se portera sur l'algorithme NSGA-II.

D'après la revue de Costa-Carrapiço et al. (2020), la taille de la population devrait être entre deux et six fois le nombre de variables de l'optimisation, sans dépasser 100 individus, ce qui correspond à une grande diversité de solutions et au-delà de laquelle il n'est pas prouvé que les résultats soient meilleurs, alors que le temps de calcul devient conséquent. Les critères d'arrêt sont pour la majorité reliés au nombre maximum de générations qui se situe entre 10 et 100 ; mais certains soutiennent qu'après un certain nombre de générations les solutions ne changeront pas. Il est alors conseillé de limiter le nombre de générations entre 10 et 50 (Poli et al., 2008).

La performance d'un algorithme se mesure à travers la qualité des solutions obtenues et la vitesse de l'exécution de l'algorithme. La qualité des résultats dépend de l'intensification et de la diversification de la recherche, illustrées à la Figure 1-9. L'intensification consiste à rechercher des solutions nouvelles au voisinage des solutions courantes pour faire progresser le front de Pareto courant vers une partie du front de Pareto optimal du problème. En parallèle, la diversification vise à explorer les solutions au-delà du voisinage des solutions courantes afin de décrire le plus largement possible l'ensemble des compromis existants dans le front optimal. L'hypervolume introduit par Knowles et Corne (2002) est adéquat pour mesurer la performance de l'algorithme car il fournit des informations sur la convergence et la diversité des solutions. Branke et al. (2008) définissent l'hypervolume en deux dimensions comme la surface ou la part de l'espace objectif dominée par le jeu de solutions, par rapport à un point de référence. Cet indicateur est illustré à la Figure 1-10 à partir des résultats d'une optimisation à deux critères qui consiste à minimiser les critères f_1 et f_2 . L'hypervolume correspond à l'espace dominé Z' par les trois solutions non dominées, par rapport au point de référence (20,20). Cet indicateur peut être choisi comme critère d'arrêt du processus d'optimisation.

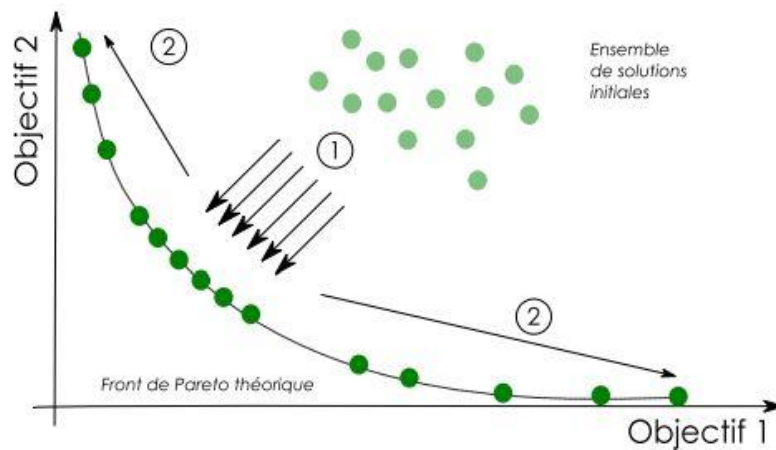


Figure 1-9 : Illustration des deux objectifs en optimisation multicritère : l'intensification (1) et la diversification (2) de l'exploration (cas d'un problème de minimisation à deux critères), d'après Recht (2016)

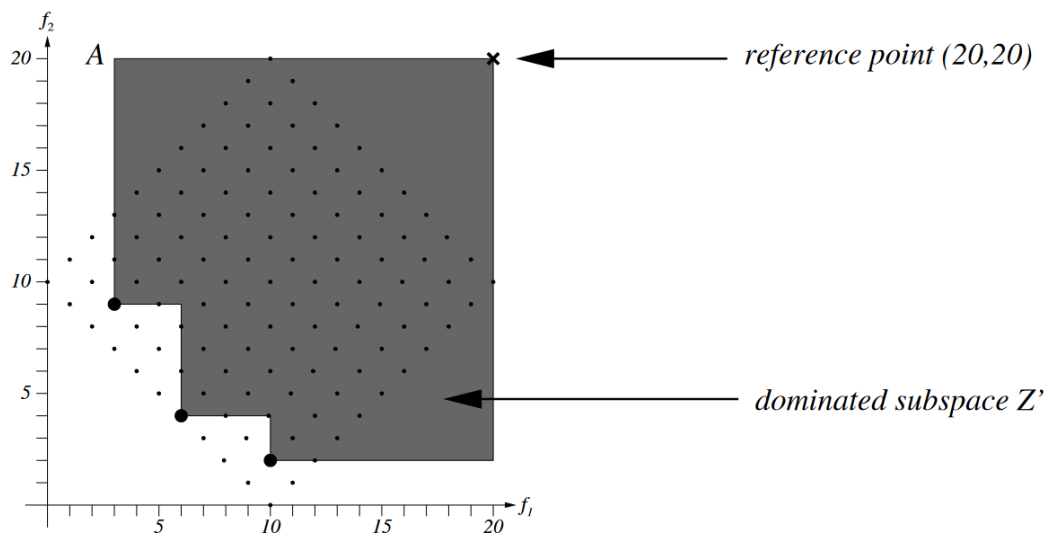


Figure 1-10 : Illustration de l'indicateur hypervolume calculé à partir d'un jeu de trois solutions non dominées et du point de référence de coordonnées (20,20) dans le cadre de la minimisation des critères f_1 et f_2 (Branke et al., 2008)

Différentes méthodes d'analyse statistique permettent de traiter les résultats d'une optimisation multicritère comme l'analyse en composantes principales, le *clustering* ou encore la régression. Une méthode complémentaire d'approche visuelle a été développée permettant d'interagir avec les résultats de l'optimisation sans connaissances statistiques préalables. Cette méthode a été implémentée dans l'outil prototype EvoGraphDice, elle combine l'analyse visuelle avec le calcul évolutif interactif pour aider à l'exploitation des données par une approche intuitive et flexible (Boukhelifa et al., 2013).

1.3.1.2 Application de l'optimisation multicritère au bâtiment

Bien que le recours à l'optimisation dans le domaine du bâtiment soit en développement depuis les années 2000 (Attia et al., 2013), on constate le besoin d'un outil d'aide à la décision présentant un faible temps de calcul et ayant une garantie de fiabilité (Hashempour et al., 2020). De plus, l'intégration de la forme à l'optimisation des bâtiments est un levier d'action essentiel mais n'en est qu'à ses débuts (Kistelegdi et al., 2022). Une revue de littérature analysant l'optimisation multi-objectifs pour concevoir les bâtiments de façon responsable indique que la fonction objectif la plus évaluée ces dernières années est la performance énergétique, suivie par le confort thermique, puis le confort visuel et le coût du cycle de vie ; enfin la fonction objectif la moins évaluée correspond aux émissions de gaz à effet de serre au cours du cycle de vie (Manni et Nicolini, 2022).

L'évaluation environnementale d'un bâtiment dépend en grande partie de son efficacité énergétique ainsi que du choix des systèmes de chauffage et de climatisation le cas échéant. Schwartz et al. (2016) utilisent l'algorithme NSGA-II pour minimiser les coûts et les impacts environnementaux du bâtiment. Ils mettent alors en évidence l'intérêt d'utiliser un logiciel commun aux différents calculs comme la quantité d'énergie grise, le coût et les consommations énergétiques lors de la phase d'utilisation du bâtiment, afin de limiter les erreurs.

Il est important de préciser que les objectifs d'une optimisation multicritère appliquée à un projet de conception de bâtiment ne sont pas obligatoirement conflictuels en matière de coût et de choix de conception, ils peuvent également représenter différents indicateurs environnementaux. C'est le cas notamment lorsque l'optimisation a pour but de minimiser les impacts de deux indicateurs environnementaux différents, comme le montre une étude des impacts environnemental du secteur du logement en Suisse (Saner et al., 2014). Il s'agit d'un cas de rénovation du bâtiment et notamment du système de chauffage. L'optimisation porte alors sur deux indicateurs *midpoints* de la méthode ReCiPe : les émissions de GES et la formation de particules, afin de contrebalancer l'impact environnemental du bois de chauffage si ce système est choisi. L'optimisation effectuée montre qu'il est possible de diminuer de 75 % les émissions de GES et de 50 % les émissions de particules fines dans ce cas d'étude.

1.3.2 La conception paramétrique à l'échelle du bâtiment

1.3.2.1 De la variation paramétrique à la conception responsable des bâtiments

Le processus de conception était initialement effectué à la main par les architectes, sans aide informatique. Seule l'expérience des architectes permettait de résoudre des situations complexes en un temps limité (Lloyd et Scott, 1995). La recherche des meilleures solutions lors des projets de conception ou de réhabilitation des bâtiments nécessite souvent de comparer différentes variantes, afin de déterminer celle qui répond le mieux aux attentes du projet en termes de confort, de performance et de

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

coût. Certains paramètres sont alors modifiés pour créer différentes variantes, on introduit alors la variation paramétrique. Cette approche est également l'un des principaux objectifs de l'évaluation environnementale des projets par la méthode de l'analyse de cycle de vie. Différentes variantes sont comparées afin de déterminer celle qui représente un moindre impact sur l'environnement. C'est le cas par exemple de Oyarzo et Peuportier (2014) qui montrent que les besoins de chauffage peuvent être réduits de 60 % suite à la réalisation de variations paramétriques, que les impacts sur le changement climatique peuvent diminuer d'environ 40 %, et qu'un gain de 55 % de l'utilisation d'énergie primaire peut être observé.

L'analyse de cycle de vie nécessite une connaissance précise des matériaux, composants et équipements utilisés afin de calculer l'ensemble des impacts environnementaux. Cette méthode est alors souvent appliquée une fois tous les paramètres fixés, en tant que vérification, dans le but d'ajuster les hypothèses de départ des projets suivants en proposant une solution plus performante. Cette approche n'est cependant pas suffisante, il faut permettre aux différents acteurs d'intervenir en phase amont des projets, au moment où les décisions importantes sont prises, en suivant le principe d'écoconception. Cette étape très amont des projets, durant laquelle l'aspect environnemental doit intervenir, correspond au choix du concept architectural, comprenant la définition de la forme des bâtiments, de leur orientation ou encore du nombre d'étages. Ainsi la conception paramétrique, qui est une conception assistée par ordinateur, permet de trouver les meilleures solutions de bâtiment selon les différents paramètres de conception. Ces derniers, notamment la longueur, la largeur et le nombre d'étages du bâtiment peuvent être modifiés pour proposer un projet optimal selon les objectifs définis en amont, et ainsi créer une synergie entre les différentes parties prenantes afin de trouver un compromis entre les aspects environnementaux et économiques par exemple.

La conception paramétrique est déjà utilisée dans de nombreux domaines, son application au secteur du bâtiment est également vaste. Cette méthode peut servir d'aide à conception d'un quartier composé d'immeubles résidentiels afin de trouver un compromis entre les architectes et les promoteurs, qui cherchent d'une part à créer un aménagement optimal du quartier, et d'autre part la rentabilité (Sung et Jeong, 2022), et aider à réduire les coûts d'ingénierie en créant et modifiant rapidement des modèles structurels tout en garantissant la sécurité structurelle des bâtiments de grande hauteur (Zhang et al., 2022). La quantité de béton nécessaire à la structure pourrait être réduite de 40 % dans ce cas. Une autre application se retrouve dans la problématique de la très forte demande en énergie pour la climatisation des maisons résidentielles aux Emirats Arabes Unis. Des infrastructures créant de l'ombre aux résidences et des nouvelles zones de stationnement sont alors étudiées à l'aide de la conception paramétrique (Bande et al., 2021). Comme dernier exemple d'utilisation de la conception paramétrique il semble pertinent de mentionner la prise en compte du confort visuel et ainsi la recherche de solutions permettant un grand nombre d'heures d'ensoleillement tout en maximisant la surface de plancher (Kim et al., 2021).

Différents outils ont été élaborés dans le but d'intégrer l'ACV à la conception paramétrique comme le proposent Basic et al. (2019) dans leurs travaux, avec le projet Bombyx, plug-in de Grasshopper 3D basé sur Rhinoceros 3D. Deux niveaux de détail sont disponibles pour modéliser les bâtiments ; il est possible de choisir une structure type du bâtiment afin de l'étudier en phase amont, tandis que les hypothèses peuvent également être faites à l'échelle du matériau, pour ainsi disposer d'une meilleure flexibilité. Les paramètres d'entrée sont les éléments de l'enveloppe du bâtiment tels que les parois verticales, les fenêtres et les plafonds, ainsi que les équipements techniques. Wiberg et al. (2019) ont également combiné Rhino Grasshopper et leur outil d'évaluation environnementale basé sur une méthode Excel afin d'effectuer des variations paramétriques en ACV avec une approche dynamique. Ce processus permet également de prendre en compte l'optimisation de la lumière naturelle en plus des impacts environnementaux du projet. Les données météorologiques proviennent d'EnergyPlus, et le flux de données est géré par l'interface de programmation visuelle Grasshopper, par l'intermédiaire d'un script Python. L'outil est ensuite adapté aux quartiers, afin de pouvoir modifier leur configuration, les choix des matériaux et leurs quantités. D'autres travaux se concentrent sur l'optimisation de la taille et de la position des fenêtres au sein des bâtiments, afin de réduire les consommations énergétiques et d'augmenter le confort visuel. Zhao et al. (2022) montrent à travers un cas d'étude que près de 17 % de la consommation énergétique annuelle d'une école peut être évitée si une variation paramétrique est effectuée en amont avec l'outil Grasshopper et ses modules Ladybug et Honeybee.

L'importance de la réalisation de l'ACV en phase amont est soulignée par de nombreux scientifiques, ainsi que l'existence d'une méthode pour la conception paramétrique menée par l'architecte. Cela implique de poser de nombreuses hypothèses concernant les composants et le type de chauffage ou de climatisation, basées sur des solutions types. Deux méthodes sont proposées dans cette optique par Hollberg et Ruth (2016). Une première approche paramétrique permet à l'architecte de générer différentes variantes dans le but d'évaluer et de comparer les impacts environnementaux. Cette méthode peut être longue et fastidieuse mais permet à l'architecte de conserver l'esthétique souhaitée du bâtiment. Une seconde approche consiste à employer un algorithme générant automatiquement les variantes calculées, elle a alors l'avantage d'être rapide et de donner un résultat optimal, mais peut s'avérer compliquée si l'architecte n'est pas familier avec l'algorithme. Il est donc nécessaire de créer des outils d'aide à la décision complets, fiables et faciles d'utilisation qui permettent de s'adapter aux différents acteurs des projets.

1.3.2.2 L'optimisation par la conception paramétrique

La conception paramétrique peut être remplacée par un algorithme, comme le proposent Hollberg et Ruth (2016) dans leur deuxième approche, mais on trouve également des études dans lesquelles l'optimisation complète la conception paramétrique. Dans ce cas, les valeurs discrètes des paramètres de forme sont définies en fonction du projet, puis un algorithme d'optimisation est mis en place afin de

trouver la solution la plus adéquate au problème posé. Le processus d'optimisation fait intervenir la modélisation, l'optimisation et la simulation (Koziel et Yang, 2011). Le modèle numérique représente le problème physique à travers des équations mathématiques, l'optimisation fait intervenir un algorithme pour trouver un jeu optimal de combinaisons de variables de conception, et la simulation permet de connaître les caractéristiques et le comportement du modèle. Le passage de la modélisation à l'environnement d'optimisation peut être complexe, un manque d'outils simples d'utilisation se fait ressentir (Costa-Carrapiço et al., 2020).

Dans la littérature scientifique, l'optimisation des bâtiments et des quartiers fait ressortir l'intérêt de la conception paramétrique en ACV liée à un algorithme génétique. Kiss et Szalay (2020) ont développé un outil combinant la modélisation 3D des bâtiments et une optimisation par un algorithme génétique. La modélisation est faite avec le logiciel Rhinoceros 3D et son extension Grasshopper, permettant d'effectuer des variations paramétriques de la géométrie du bâtiment ainsi que d'autres variables. Les simulations énergétiques sont effectuées sur EnergyPlus, les données environnementales sont tirées de la base de données Suisse ecoinvent 3.4, et l'ensemble est développé avec des composants utilisant le langage Python. Les variations proposées dans leur cas d'étude portent sur le nombre d'étages, la taille du bâtiment, le ratio d'ouvertures par rapport aux parois opaques, le type de fenêtres, les épaisseurs d'isolation et la prise en compte ou non de l'ombrage. Les équipements et les éléments de chauffage et de ventilation sont également pris en compte en tant que paramètres mais n'interviennent pas dans l'optimisation. Les résultats montrent qu'avec une optimisation multi-objectifs il est possible de diminuer de 60 à 80 % les impacts environnementaux par rapport au bâtiment initial.

1.4 Spécificités de l'échelle quartiers

En 2018, 54 % de la population mondiale vivait en zone urbaine, et une augmentation est estimée jusqu'à 68 % d'ici 2050, contre 30 % en 1950 (United Nations et al., 2019). L'extension des zones urbaines laisse penser que l'évaluation du bâtiment serait pertinente dorénavant à l'échelle du projet urbain. D'autant plus que plus l'échelle s'agrandit, plus les leviers d'action deviennent conséquents. Les frontières des systèmes sont alors élargies et l'aide à la décision pour améliorer au mieux la performance globale peut porter sur des choix effectués par des entités agissant à l'échelle du quartier ou de la ville qui ne sont pas accessibles lors des projets à l'échelle du bâtiment. En effet, les décisions prises en matière d'urbanisme influencent fortement les secteurs du bâtiment et des transports, qui représentent une très grande part des impacts environnementaux.

La performance environnementale concerne l'échelle microlocale d'un bâtiment isolé, l'échelle locale d'un quartier ainsi que l'échelle large d'une agglomération ou d'un territoire. Les travaux de recherche associés à ce secteur sont donc très nombreux, et les sujets sont vastes. Le lab recherche

environnement VINCI ParisTech, collaboration entre des équipes de recherche de trois écoles ParisTech (Mines Paris, Ponts ParisTech et Agro ParisTech) et VINCI, contribue au développement de ces connaissances depuis 2008. La forme urbaine influence les performances des bâtiments en terme de pertes de chaleur, de mouvements d'air et d'apports solaires. La mobilité des occupants des bâtiments dépend de la desserte locale des transports en communs, des accès piétons et cyclistes ainsi que des facilités de déplacement des véhicules automobiles. La conciliation entre ville et nature est également un enjeu important dans ces lieux hautement artificialisés, la végétalisation des toitures, façades et espaces extérieurs est étudiée ainsi que la perméabilité des sols et le rapport de la population à la biodiversité (Peuportier et al., 2018).

L'étude des quartiers et des villes ne s'arrête pas aux aspects énergétiques et environnementaux, l'analyse des comportements et de la répartition dans l'espace des différentes communautés et classes sociales permettent de comprendre et ainsi de prendre en compte les enjeux de manière plus globale. Teller (2010) explique que le contexte de péri-urbanisation, notamment dans la région Wallone en Belgique, fait de la mobilité une ressource vitale dans un environnement urbain de plus en plus éclaté. Les enjeux environnementaux coexistent alors avec les problématiques de cohésion sociale et de sécurité. La région Wallone constate une délocalisation des populations aisées du centre-ville vers la zone péri-urbaine, au sein de laquelle on observe une fragmentation contraire à la volonté de mixité sociale, car l'installation des populations est régie par la classe sociale, les moyens économiques et la période de mise à disposition des terrains. Les lotissements péri-urbains gardent donc une certaine homogénéité et sont globalement aisés, ce qui impose de repenser la répartition des ressources et de raisonner à l'échelle de la métropole afin de ne pas pénaliser encore plus les populations en situation de précarité. En effet, le montant des taxes payées par les occupants sont proportionnelles aux revenus de ces derniers, si les fonds ne sont pas répartis à l'échelle de la métropole, alors les communes péri-urbaines vont s'enrichir au détriment de l'hyper-centre en creusant les inégalités. La ségrégation socio-spatiale donne matière à réflexion, d'autant plus que l'étude des inégalités environnementales révèle que la qualité des logements est la première cause d'inégalités en Wallonie tandis que la desserte des transports en communs peut être vue comme une compensation territoriale car l'offre est plus concentrée dans les quartiers hébergeant des foyers précaires (Lejeune et al., 2013).

1.4.1 Frontières du système

La réalisation d'une analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier nécessite l'adaptation des frontières du système étudié. En fonction des objectifs de l'étude, il peut être pertinent de prendre en compte l'impact environnemental des réseaux, des transports ou encore des déchets ménagers. Les frontières seront définies en fonction de l'approche choisie, comme présenté dans la section 1.2.2. Ainsi, pour établir un diagnostic ou un bilan environnemental d'un quartier, l'approche attributionnelle pourra

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

être utilisée, tandis que l'étude de la conséquence de la décision d'implémenter ou de réhabiliter le quartier adoptera plutôt une approche conséquentielle, adaptant les frontières du système en conséquence.

Les réseaux font partie intégrante du fonctionnement des quartiers. En effet, les quartiers comportent des réseaux d'eau, d'électricité et de chaleur, et dépendent également des réseaux de transport en commun. Cette organisation en réseaux présente un avantage considérable d'étudier les bâtiments à l'échelle du quartier, ainsi les différents types d'approvisionnement sont pris en compte dans le système et peuvent être optimisés. Les réseaux de chaleur et de froid couvrent 11 à 12 % des besoins thermiques en Europe, et permettent de mobiliser les sources d'énergie renouvelables ou fatales comme la récupération de chaleur lors de l'incinération des déchets, ou l'énergie éolienne (Patureau et al., 2021). La diversité des technologies de production de chaleur implémentées au sein d'un réseau permet de maintenir le fonctionnement du réseau pour toutes les conditions météorologiques, et assure également une robustesse permettant de prévenir les éventuels problèmes temporaires d'approvisionnement ou de dysfonctionnement.

Les impacts dus aux transports proviennent de la demande en énergie et des émissions de polluants liées à l'utilisation, la fabrication et le traitement en fin de vie des véhicules d'une part, et d'autre part des infrastructures de transport qui peuvent à elles seules créer des atteintes à la biodiversité et aux terres agricoles. L'utilisation des transports pour la mobilité des personnes et des biens est également responsable d'un grand nombre d'émissions relatives à ce secteur, qui dépendent des flux de déplacements induits par la répartition dans l'espace des bâtiments dédiés aux diverses fonctions d'habitation, de production et de services (Peuportier et al., 2013). L'évaluation environnementale conséquentielle des transports permet d'orienter la prise de décision lors des projets d'aménagement urbain et doit être étudiée de manière conjointe avec la performance énergétique des bâtiments si l'objectif est de définir le plan masse du quartier par exemple en étudiant l'intérêt de la mixité d'usage (Roux, 2016). Le réseau électrique est également un levier d'action majeur pour la réduction des impacts environnementaux des transports car son renforcement permettrait la mutualisation des moyens de production à l'échelle continentale, une approche conséquentielle permet également d'évaluer les impacts associés à un tel projet (Audard, 2016). Les frontières du système dépendent exclusivement des objectifs de l'ACV, l'échelle du quartier peut être un levier pour prendre en compte les impacts des transports en complément des impacts des bâtiments, mais cette approche n'est pas obligatoire, elle doit être définie dans le cadre de l'étude d'ACV.

1.4.2 Conception des quartiers à moindre impact environnemental

1.4.2.1 L'ACV des quartiers

L'application de l'analyse de cycle de vie s'est étendue au secteur du bâtiment dans les années 1990 et aux quartiers dans les années 2000. Elle se développe de plus en plus pour répondre aux problématiques actuelles de construction durable.

La littérature scientifique recense de nombreuses études portant sur l'ACV des bâtiments et des transports, et on voit actuellement l'émergence des travaux à l'échelle des quartiers (Oliver-Solà et al., 2011). On remarque un manque d'outils permettant de proposer des quartiers à haute efficacité environnementale, répondant à des problématiques de conception bioclimatique, de densité urbaine et de mobilité. On sait cependant que l'orientation des bâtiments, la compacité et la densité urbaine ont une influence non négligeable sur les besoins de chauffage et de climatisation qui représentent une part importante des impacts environnementaux des bâtiments anciens et donc des quartiers dans lesquels ces derniers se situent. La densité influence également les transports et permet la rentabilité du chauffage urbain, ce paramètre a donc un impact environnemental important, notamment dans les quartiers neufs.

L'ACV à l'échelle des quartiers peut être très complexe du fait de la grande diversité des cas d'étude, des limites des systèmes prises en compte, des indicateurs évalués ou encore de l'unité fonctionnelle choisie. La modélisation d'un quartier prend en compte les impacts des bâtiments, des réseaux d'eau et d'électricité, des espaces extérieurs tels que les routes, chaussées, parkings, l'éclairage public, les espaces verts (Herfray, 2011), et de la mobilité (Lotteau et al., 2015). L'unité fonctionnelle décrivant les différents travaux étudiés est très hétérogène, le choix peut porter sur le quartier entier, proposer un ratio par foyer, par habitant, par m² de surface au sol, de surface chauffée ou encore par m² de surface habitable par habitant. Dans un souci de comparaison des différents cas d'étude et des scénarios, Stephan et al. (2013) statuent qu'il est particulièrement pertinent de présenter simultanément les résultats absolus, par habitant et selon une référence spatiale, afin de représenter clairement les effets de densité urbaine. Ce choix met également en évidence les différences sociales.

L'application de la méthode de l'ACV à l'échelle des quartiers impose des hypothèses portant sur les distances relatives aux sites de gestion des déchets ménagers, les précipitations et la gestion de l'eau de pluie, les eaux souterraines et le réseau d'eaux usées (Nematchoua et al., 2020). Les indicateurs environnementaux présentés au paragraphe 1.1.1.3 sont pertinents à l'échelle du quartier, et ils peuvent être complétés par l'impact sur la qualité des sols, représenté par les indicateurs suivants (Herfray, 2011) :

- le rapport surface construite / surface totale, rendant compte de la densité des bâtiments ;
- l'indicateur traduisant l'imperméabilisation moyenne de la surface du quartier, caractérisant la quantité d'eau de pluie s'infiltrant dans le sol.

Différentes méthodes sont utilisées pour analyser et optimiser les impacts environnementaux des quartiers, dont la conception paramétrique, la conception d'archétypes, ou d'autres modèles simplifiés.

1.4.2.2 L'optimisation par la conception paramétrique

L'impact environnemental des quartiers dépend de nombreux critères portant sur les bâtiments tels que la morphologie urbaine, la surface de matériaux et de végétation, les équipements énergétiques et la compacité. La hauteur moyenne des bâtiments pourrait également être un paramètre d'étude intéressant. La conception paramétrique des quartiers est donc un élément de recherche qu'il serait nécessaire d'approfondir, dans le but d'élargir les solutions de conception et ainsi de minimiser les impacts environnementaux tout en permettant aux architectes et aux autres acteurs des projets de garder la main sur les choix de conception.

Au cours des deux dernières décennies, il a été constaté un besoin de nouveaux outils de simulation dédiés à la performance des quartiers qui sont capables de modéliser plusieurs bâtiments à haute efficacité énergétique. C'est dans ce cadre que l'outil Umi (Reinhart et al., 2013) a été développé, basé sur Rhinoceros 3D et couplé avec EnergyPlus et Radiance/Daysim, par l'intermédiaire de scripts Python et Grasshopper. Umi permet de modéliser de manière intuitive des plans masse de quartiers ou de villes en définissant les caractéristiques de l'enveloppe des bâtiments, les arbres, les ombres et les rues. Des modèles prédéfinis sont associés à chaque bâtiment, il est alors possible de choisir le rapport de surface des planchers, le ratio d'ouvertures par rapport aux parois opaques et les composants des bâtiments. Le couplage avec EnergyPlus permet de calculer la consommation énergétique de chaque bâtiment tandis que l'outil Umi peut calculer l'énergie grise nécessaire à la construction des bâtiments, et le couplage avec Daysim permet de définir la contribution d'une façade donnée au niveau d'éclairement naturel intérieur. L'outil Umi a été conçu dans le but d'accompagner les acteurs des projets dans leurs prises de décision, notamment pour que les architectes puissent avoir une idée de la performance environnementale de leurs projets à l'échelle du quartier ou de la ville.

1.4.2.3 Analyse et optimisation des quartiers

La conception ou la rénovation des bâtiments peut s'avérer complexe à différents niveaux ; la performance des bâtiments est nécessaire d'un point de vue économique et environnemental, mais aussi d'un point de vue social, notamment pour lutter contre la précarité énergétique. Dans le cas de la rénovation d'un parc de bâtiments, de nombreuses mesures peuvent être prises grâce aux techniques actuelles qui sont variées et développées, cependant un enjeu économique majeur intervient ; différentes contraintes budgétaires et logistiques ne permettant pas de programmer une rénovation complète de l'ensemble des bâtiments au même moment. En effet, la rénovation complète est recommandée contrairement à la rénovation par partie, afin de ne pas dégrader les performances du bâtiment. Par exemple, le remplacement des anciennes fenêtres par un vitrage plus performant et étanche sans modifier

la ventilation peut amener de la moisissure dans le bâtiment qui ne sera alors plus assez ventilé, car le renouvellement d'air des bâtiments anciens provient en partie des infiltrations d'air par les fenêtres. Or les projets de rénovation portés par les gestionnaires ont des budgets alloués limités et les financements peuvent être répartis sur plusieurs années, empêchant une rénovation complète du parc à un moment donné. L'autre contrainte non négligeable de la rénovation des parcs immobiliers est l'accessibilité des logements ; les occupants nécessitent d'être relogés si l'intérieur des bâtiments leur est inaccessible, ce qui correspond à une grande contrainte logistique. Pannier et al. (2021) proposent une méthodologie utilisant l'optimisation multicritère pour aider les gestionnaires de parcs immobiliers à définir les priorités de rénovation du parc. L'algorithme d'optimisation multicritère NSGA-II est adapté à l'échelle multibâtiment et multi-année pour minimiser le coût d'investissement et les consommations énergétiques tout en prenant en compte le budget annuel alloué à la rénovation du parc.

La dimension environnementale impose une contrainte supplémentaire, car l'impact du quartier ou de la ville sur l'environnement doit être évalué le plus précisément possible à l'échelle locale afin de proposer des leviers d'action aux parties prenantes. Dorr et al. (2022) proposent une méthode d'évaluation d'impacts de l'alimentation, des transports et des bâtiments à partir d'outils de modélisation. L'analyse des bases de données recensant les caractéristiques des bâtiments dans les villes a permis de définir des archétypes représentatifs des bâtiments de la ville et d'estimer les impacts environnementaux relatifs au secteur du bâtiment pour l'ensemble de la ville. À partir de cette évaluation des leviers peuvent être proposés à travers l'étude de différents scénarios de rénovation des bâtiments, de règles de circulation et de comportement des habitants concernant leur alimentation.

1.5 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons présenté un état de l'art sur la méthode d'analyse de cycle de vie pour l'écoconception des bâtiments et des quartiers, ainsi que l'optimisation multicritère. L'aspect environnemental des projets doit être pris en compte en phase amont de la conception de bâtiments, et si possible dès la phase d'aménagement du quartier, pour maximiser les degrés de liberté. Cependant, l'ACV nécessite des données précises concernant les matériaux et les systèmes implémentés, qui ne sont pas encore connus à ce stade du projet. Il est alors nécessaire d'adapter les outils existants pour permettre aux différents acteurs des projets de comprendre l'influence des décisions prises lors des phases très amont, telles que le choix de la forme des bâtiments, ou de l'aménagement du quartier. De plus, la recherche des meilleures solutions au niveau environnemental mais aussi économique implique le choix de l'optimisation multicritère.

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception des bâtiments au sein des quartiers

Afin de répondre à ces enjeux, nous proposerons dans cette thèse d'étudier une démarche d'optimisation multicritère environnementale à l'échelle multibâtiment, et l'influence de la forme des bâtiments par la méthode de la conception paramétrique.

Un algorithme d'optimisation permet la recherche des meilleures variantes de bâtiment selon les critères définis. L'enveloppe des bâtiments influence fortement les besoins de chauffage et les impacts environnementaux associés, ce qui conduit à préférer une forte isolation des parois. Cependant la fabrication et la fin de vie des matériaux utilisés ont également un impact sur l'environnement, une synthèse est alors nécessaire pour réduire globalement les impacts. L'optimisation doit donc être réalisée sur tout le cycle de vie du bâtiment. Le développement d'une procédure d'optimisation à l'échelle multibâtiment permet d'élargir la vision d'ensemble des projets et des impacts afin de prendre les meilleures décisions possibles. Ce travail est présenté dans le chapitre 3 de cette thèse.

La forme des bâtiments influence également les impacts environnementaux des bâtiments en modifiant les apports solaires, la compacité des bâtiments, ou encore les quantités de matériaux nécessaires aux fondations. Comparer les variantes environnementales dès la définition du concept architectural serait nécessaire, mais la réalisation d'une ACV pour connaître l'impact environnemental de chaque variante serait chronophage. Dans le chapitre 4, nous proposons une méthodologie pour estimer l'influence de la forme des bâtiments grâce à la conception paramétrique

Le prochain chapitre concerne les outils utilisés pour la réalisation des ACV, et le cas d'étude sur lequel sera appliquée la méthode afin d'illustrer les différents développements.

2 L'ACV à l'échelle d'un projet urbain

Ce chapitre a pour but de présenter les outils de modélisation pour la réalisation des STD et ACV ainsi que les outils de modélisation complémentaires utilisés. Plusieurs améliorations sont apportées à ces outils, et l'élaboration d'une référence environnementale pour l'aide à l'évaluation des projets est développée. Le cas d'étude de la thèse est également présenté ainsi que les résultats des simulations énergétiques et environnementales.

2.1 Description des outils et des améliorations

2.1.1 La suite logicielle Pleiades

2.1.1.1 Généralités

Pléiades est un logiciel complet pour les projets d'écoconception des bâtiments. Différents types de calculs sont disponibles à partir d'une maquette numérique ou d'une modélisation graphique, tels que la simulation thermique dynamique, la vérification du respect de la réglementation environnementale des bâtiments, le dimensionnement des équipements ou encore l'analyse statistique. Au-delà des aspects énergétiques, l'analyse de cycle de vie permet d'évaluer les impacts du bâtiment sur l'environnement.

Ce logiciel a d'abord été développé par le Groupe Écoconception et Thermique du Bâtiment (ETB) à l'école des Mines de Paris sous la direction de Bruno Peuportier, puis commercialisé et distribué par la société Izuba (depuis 2001). La suite Pléiades contient six modules, qui sont décrits ci-dessous, et illustrés sur la Figure 2-1.

- **Bibliothèque** : base de données de tous les éléments disponibles, notamment les matériaux, les unités de CVC, les fenêtres et les portes. Elle contient également les éléments nécessaires à la description de l'utilisation (scénarios) et de l'environnement proche du bâtiment.
- **Modeleur** : saisie graphique de modèles de bâtiments en 2D à partir d'un plan, d'un projet Revit ou d'une maquette numérique. Une fois la géométrie créée, sont définies les compositions des parois, les types de fenêtres et de portes, ainsi que les scénarios décrivant l'utilisation des différentes zones thermiques. Ce composant comprend de nombreuses affectations automatisées (compositions, ponts thermiques etc.) permettant un gain de temps pour le paramétrage et le lancement des calculs. Sa visualisation 3D donne la possibilité de vérifier la cohérence de la saisie et de dimensionner les protections solaires. Pleiades Modeleur permet également l'évaluation de la performance environnementale selon les méthodologies d'ACV RE2020 et E+C-.
- **BIM** : importation de modèles numériques aux formats gbXML et IFC 4 à partir desquels un projet Editeur est ensuite créé. Cet outil a pour but de synchroniser le modèle physique et le modèle énergétique du bâtiment afin d'éviter les nouvelles saisies à chaque évolution du projet.
- **Éditeur** : outil dédié aux simulations thermiques dynamiques (STD). Il utilise le moteur de calcul COMFIE qui est en développement constant. Divers autres modules de calcul complémentaires (tels que RT 2012/RT ex) sont disponibles pour le contexte réglementaire français spécifique. Il propose un modèle multizone : le bâtiment (conçu avec le Modeleur

ou directement importé du BIM) est subdivisé en zones thermiques, dans lesquelles sont ensuite calculés différents indicateurs liés au confort.

- ACV : analyse du cycle de vie des bâtiments et des quartiers. Afin de réaliser l'analyse du cycle de vie d'un bâtiment, il est indispensable d'avoir modélisé le bâtiment et réalisé une simulation thermique dynamique au préalable. L'outil ACV propose une analyse de cycle de vie basée sur le moteur de calcul EQUER développé initialement en 1995 par Bruno Peuportier et Bernd Polster au Centre d'efficacité énergétique des systèmes de l'École des Mines de Paris (Polster, 1995) puis amélioré au cours du temps.
- Résultats : présentation et analyse des résultats de la simulation thermique dynamique.

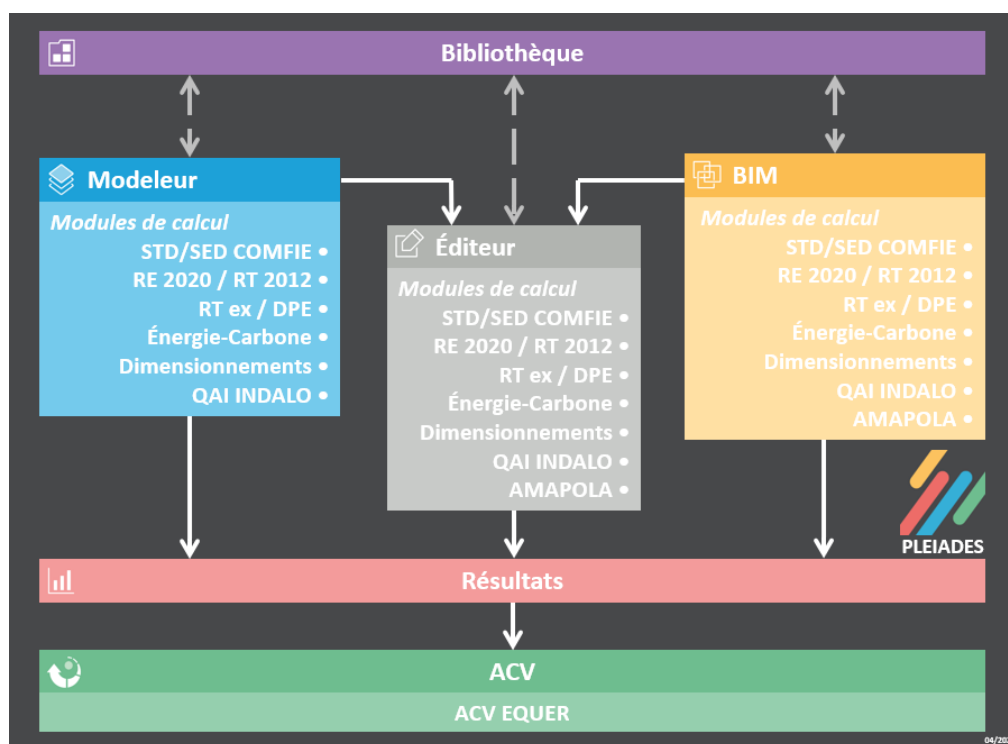


Figure 2-1 : Organisation de la suite logiciel Pleiades, source : www.izuba.fr

2.1.1.2 Pleiades STD, COMFIE

Le modèle physique COMFIE (Peuportier et Sommereux, 1990) de la suite Pleiades est utilisé pour la simulation thermique dynamique (STD) des bâtiments. Ce moteur de calcul utilise une programmation orientée objet permettant de construire numériquement un bâtiment en faisant correspondre des objets informatiques à des objets réels, et ainsi créer facilement des variantes de conception. Le calcul est basé sur l'analyse modale, une technique de réduction de modèle qui a été adaptée à la thermique, permettant de traiter un bâtiment multizone de manière rapide, sans perte de précision significative sur les résultats. Les besoins de chauffage et de refroidissement, l'humidité et les températures de chaque zone sont calculés en prenant en compte la transmission de chaleur par

Chapitre 2. L'ACV à l'échelle d'un projet urbain

conduction, convection et rayonnement ainsi que l'inertie thermique du bâtiment et les échanges entre les zones thermiques.

Le module STD COMFIE réalise le calcul des besoins ainsi que des consommations énergétiques des équipements à chaque pas de temps et permet de connaître les pertes ainsi que le confort thermique, simple ou adaptatif, calculé en fonction des températures et de l'humidité de l'air. L'interface est détaillée et permet à l'utilisateur de modéliser entièrement son projet puis de visualiser les résultats thermiques en choisissant les données météorologiques propres à l'emplacement du bâtiment étudié. Le calcul aéraulique est proposé, ainsi les débits de ventilation naturelle peuvent être obtenus en tenant compte de l'effet du vent et du tirage thermique. Le logiciel met également à disposition un module effectuant le calcul du confort lumineux, ainsi que des composants, intégrés ou à créer par l'utilisateur, par exemple l'intégration d'une installation photovoltaïque.

2.1.1.3 Pleiades ACV, EQUER

L'ACV importe depuis l'éditeur les quantités de matériaux utilisés pour la construction du bâtiment et les informations liées à la simulation thermique, telles que les besoins de chauffage, de climatisation, la production photovoltaïque, etc. Ces valeurs sont transmises au moteur de calcul EQUER en vue d'évaluer la performance environnementale à partir d'une base de données environnementale provenant d'ecoinvent adaptée au logiciel, nommée base de données EQUER. Certaines informations complémentaires sont ensuite renseignées par l'utilisateur dans l'outil ACV :

- Les associations entre les éléments importés depuis l'éditeur (matériaux de construction, équipements, fenêtres etc.) et les fiches environnementales disponibles dans la base de données EQUER ainsi que leur durée de vie,
- Les quantités de matériaux qui n'interviennent pas ou très peu dans la simulation thermique, et qui ne sont donc pas intégrées à la modélisation effectuée à l'étape précédente (par exemple, les fondations et les installations sanitaires et électriques),
- Le nombre d'occupants, la surface totale, les sources d'énergie, la gestion des déchets et de l'eau, le transport quotidien des occupants, et la durée de vie du bâtiment. La fonction du bâtiment et les quantités de référence nécessaires à la définition de l'unité fonctionnelle sont ainsi renseignées.
- La version de la base de données EQUER doit être choisie et peut être complétée par l'utilisateur si le projet contient des données environnementales spécifiques absentes de la base de données proposée.
- Les distances de transport concernant la provenance des matériaux de construction (neufs ou recyclés) et le traitement des déchets.

Ces deux derniers points interviennent dans le choix des inventaires de cycle de vie considérés pour les différents éléments du bâtiment étudié. Enfin, les résultats présentent les impacts environnementaux

des différentes composantes du bâtiment, les détails par catégorie (matériaux, usages) et par étape du cycle de vie sont disponibles, et ce pour tous les indicateurs environnementaux calculés par la méthode EQUER. Le choix des indicateurs et l'interprétation des résultats revient donc entièrement à l'utilisateur.

Pleiades ACV propose donc une méthode pour l'écoconception des bâtiments en respectant la norme ISO 14044. En effet, la définition des objectifs, l'inventaire, l'évaluation des impacts sur l'environnement et l'interprétation des résultats sont à définir par l'utilisateur et sont donc propres à chaque projet.

2.1.2 Les outils complémentaires

2.1.2.1 Amapola

Amapola est un module complémentaire du logiciel Pleiades, développé par la société Kocliko. Il ajoute une dimension statistique à la simulation en proposant une garantie de performance énergétique, une modélisation stochastique de l'occupation des bâtiments et un outil d'optimisation.

Les différentes fonctionnalités du logiciel sont les suivantes :

- Analyse de sensibilité : identification des paramètres les plus influents sur les consommations énergétiques ou le confort thermique
- Analyse d'incertitude : estimation de l'incertitude des résultats afin d'évaluer le niveau de confiance des résultats obtenus
- Modélisation du comportement des occupants : estimation des périodes d'occupation du bâtiment et des sollicitations associés en prenant en compte les caractéristiques socio-professionnelles des occupants par des lois probabilistes étalonnées
- Calcul d'ajustement de la garantie de performance énergétique en fonction de paramètres mesurables du bâtiment
- Performance : exécution de centaines de simulations en local ou dans le cloud, les simulations sont parallélisées pour réduire le temps de calcul
- Optimisation multicritère : détermination des meilleurs choix de conception en fonction de différents critères énergétiques, économiques ou environnementaux (CO₂) par un algorithme génétique, avec la possibilité de définir des contraintes.

La procédure d'optimisation multicritère environnementale développée dans ces travaux de thèse part de cette dernière fonctionnalité disponible dans Amapola ; l'outil préexistant calcule uniquement les consommations et l'impact carbone de l'étape d'utilisation, nous étendrons son application à l'ensemble du cycle de vie du bâtiment pour différents indicateurs environnementaux et à l'échelle multibâtiment.

2.1.2.2 Simulations multiples

Le moteur de calcul COMFIE a été conçu pour évaluer les besoins et le confort thermique d'un bâtiment, mais également pour permettre une comparaison rapide de différentes variantes. Un outil de variation paramétrique est disponible à partir de la plateforme de l'éditeur du logiciel ; de nombreuses composantes du bâtiment peuvent être sélectionnées telles que la composition des parois, les ouvertures ou encore les scénarios, afin de générer automatiquement de nouvelles variantes du bâtiment modifiant les valeurs des paramètres choisis. Par exemple, pour connaître l'influence de l'épaisseur d'isolant dans les murs extérieurs sur les résultats thermiques, il est possible de générer des variantes du bâtiment en modifiant l'épaisseur du matériau ; l'utilisateur choisit les valeurs des bornes supérieure et inférieure et le pas de calcul. Les simulations ne sont pas parallélisées donc le temps de calcul n'est pas réduit, mais cet outil de variations paramétriques permet de s'affranchir de la modification manuelle répétitive du modèle.

Sur ce principe, le moteur de calcul COMFIE a été regroupé en un bloc qui utilise en entrée le modèle du bâtiment initial ainsi que les différentes variantes souhaitées (modification d'une épaisseur d'isolant ou d'une taille d'ouverture par exemple), et calcule les caractéristiques thermiques des différentes variantes de bâtiment. Ce bloc est nommé « *Blackbox STD* », car il permet de faire appel à l'ensemble de la méthode de calcul COMFIE sur Python en une seule commande, et ainsi de s'affranchir des procédés complexes compris dans COMFIE. Cet outil est utilisé dans le module Amapola, les simulations sont parallélisées induisant un gain de temps considérable. Il est possible d'utiliser l'outil *optimisation STD* d'Amapola afin de générer le fichier d'entrée contenant les caractéristiques des différentes variantes. Ce fichier comprend l'élément à modifier, son emplacement au sein du bâtiment, et la nouvelle valeur à appliquer. Les sorties se présentent sous la forme d'un fichier par variante, décrivant l'ensemble des caractéristiques thermiques. Le principe de fonctionnement de l'appel de l'outil de simulations multiples est présenté à la Figure 2-2. La génération de nombreuses variantes STD est ainsi réalisable simultanément, cela permet de comparer rapidement des variantes entre elles.

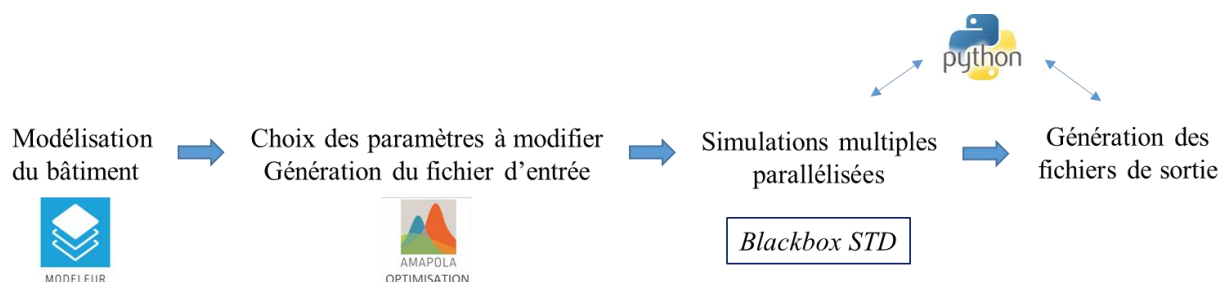


Figure 2-2 : Schéma de fonctionnement de la Blackbox STD

Pour connaître l'impact environnemental des variantes de bâtiments, un calcul ACV est également nécessaire. D'une part, les quantitatifs de matériaux et d'équipements sont transférés du modèle du bâtiment au moteur de calcul EQUER pour connaître l'impact de la fabrication, du remplacement et de

la fin de vie de ces éléments. D'autre part, les impacts liés à l'utilisation du bâtiment sont calculés dans un code python dont le développement a été poursuivi au cours de cette thèse ; il sera présenté dans le chapitre 3. Les besoins thermiques, exprimés en kWh, correspondant à l'énergie nécessaire pour chauffer et climatiser le bâtiment à la température de consigne toute l'année, sont multipliés par l'impact sur l'environnement d'un kWh produit par une technologie particulière (chaudière gaz, chauffage électrique etc.). Dans le cas des réseaux de chaleur, Pleiades ACV permet la saisie de la répartition des différentes technologies (mix de production de chaleur) en fonction de la proportion dans laquelle elles interviennent. Enfin, comme indiqué précédemment, il s'agit de compléter la simulation ACV par les éléments qui n'interviennent pas ou peu dans la thermique du bâtiment, la durée de vie des différents éléments et par les autres informations nécessaires à l'évaluation environnementale globale, telles que les quantités d'eau froide et d'eau chaude sanitaire utilisées ou encore le transport des occupants et les déchets ménagers, si ces derniers sont pris en compte dans l'unité fonctionnelle.

La simulation multiple ne peut pas consister à générer automatiquement de nombreuses variantes STD pour ensuite effectuer l'ACV de chaque variante manuellement. Elle nécessite alors un outil complémentaire au moteur de calcul EQUER, permettant, comme le fait la *Blackbox STD*, de lancer le calcul ACV en un seul bloc pour effectuer également la simulation multiple. L'entreprise Izuba, développeur du logiciel Pleiades, contribue à ces travaux de recherche en fournissant l'outil de simulation multiple ACV, que l'on nomme *Blackbox ACV*. Cet outil transfère les quantitatifs de matériaux depuis le modèle, et calcule les impacts associés aux besoins thermiques. Il fonctionne d'une manière similaire à l'outil de simulation multiple STD ; il nécessite en entrée une variante ACV ainsi qu'un fichier d'entrée recensant l'ensemble des éléments à modifier. Par exemple, dans le cas du changement d'épaisseur d'isolant, le fichier d'entrée contient la quantité de l'isolant des différentes variantes qui est exprimée à travers son volume. Les fiches environnementales des isolants comprenant les impacts par kg de ces derniers, la masse volumique importée depuis la simulation thermique permet de calculer les impacts créés par l'isolant pour chaque variante. L'outil permet de prendre en compte les impacts de la fabrication et de la fin de vie de chaque élément modifié. Mais les quantitatifs de matériaux ne sont pas les seuls éléments qu'il est possible de faire varier dans cet outil ; si la variante STD modifie le type de fenêtre, en remplaçant du simple vitrage par du double vitrage par exemple, alors la *Blackbox STD* s'alignera et modifiera la fiche environnementale associée à la fenêtre en question.

Cependant, il n'existe pour le moment pas de lien entre ces outils, qui dépendent tous deux uniquement de la variante de base, STD ou ACV. L'utilisation de la *Blackbox ACV* impose à l'utilisateur de générer le fichier d'entrée comprenant les modifications des différentes variantes, que l'on nomme fichier tirage. Un script Python a été créé en vue de répondre à cette contrainte, car les variantes peuvent être nombreuses et la perte de temps serait considérable s'il fallait générer le fichier tirage manuellement. Ainsi, le fichier d'entrée STD est adapté aux entrées nécessaires à la simulation multiple ACV. La structure des fichiers tirages STD et ACV est similaire, elle est composée d'un en-tête décrivant

Chapitre 2. L'ACV à l'échelle d'un projet urbain

respectivement la composition dans laquelle se trouve l'élément et le nom de l'élément en question. Ensuite, chaque ligne du fichier correspond à une variante, ainsi pour N variantes de bâtiment, N lignes sont créées, dans lesquelles les éléments et leurs quantitatifs sont décrits pour la STD, et les quantitatifs ou les fiches environnementales sont décrites dans le cas du tirage ACV. Un exemple de tirages STD et ACV est présenté Tableau 2-1.

Tableau 2-1: Exemple de génération des fichiers tirage STD et ACV

		Tirage STD	Tirage ACV
Changement de l'épaisseur d'isolant	En-tête	Nom_composition	Vol $\square$ Nom_isolant
	N lignes	Nom_isolant (Épaisseur en cm)	Volume en m3
Changement de type de fenêtre	En-tête	Nom_vitrage_initial	Impact $\square$ Nom_vitrage
	N lignes	Nom_vitrage	Fiche ACV fenêtre

Les éléments qui ne sont pas modifiés dans le tirage ACV sont repris de la variante de base. C'est pour cela que dans le Tableau 2-1, le nom de l'isolant ou du vitrage provenant du modèle du bâtiment est suffisant pour réaliser une ACV, car le lien entre ce dernier et la fiche environnementale est fait dans la variante ACV de base. Cette fonctionnalité est très utile car seule la modification de l'élément en question est nécessaire, le reste du modèle est pris en compte dans la simulation. Cependant, elle impose dans certains cas une étape supplémentaire. Lorsque l'un des objectifs de l'étude est de déterminer la proportion optimale de surface vitrée par rapport aux parois opaques, les variantes paramétriques prennent en compte la variation de surface des fenêtres. Mais l'augmentation du nombre de fenêtres, ou de leur taille, engendre une réduction des parois opaques du bâtiment, et donc du quantitatif des éléments composant la paroi concernée dont le matériau structurel (par exemple le béton), l'isolant, et le revêtement. La modification des parois doit donc apparaître dans le fichier tirage ACV, un calcul simple est intégré au code afin d'adapter tous les quantitatifs nécessaires.

Enfin, l'étape d'utilisation du bâtiment doit être traitée séparément. Les besoins thermiques font partie des éléments qui sont récupérés de la variante de base ; or la grande majorité des variantes paramétriques influencent les performances thermiques du bâtiment, en modifiant la quantité d'isolant, de fenêtres ou encore le type de vitrage. Les besoins doivent donc être recalculés en parallèle pour permettre une évaluation correcte des impacts sur l'environnement de chaque variante. La solution repose sur le développement d'un script python, qui garde en mémoire les besoins thermiques de chaque variante, calculés par la Blackbox STD, et calcule les impacts environnementaux correspondants. Pour cela, il est nécessaire de sélectionner un mix électrique indiquant la proportion des technologies utilisées pour la production d'électricité, et les impacts environnementaux de chaque technologie produisant de l'énergie. La simulation environnementale multiple, réalisée par l'intermédiaire de la *Blackbox ACV* et de plusieurs scripts python permet d'évaluer rapidement les impacts environnementaux de chaque

variante de bâtiment tout en ayant un large degré de liberté ; le calcul des impacts de l'étape d'utilisation par l'intermédiaire du script python permet notamment d'implémenter un mix électrique dynamique afin de calculer les impacts horaires en prenant en compte la variabilité temporelle de la demande et de la production d'électricité. Les résultats sont générés sous deux formes différentes ; un fichier recense les impacts environnementaux totaux du bâtiment pour tous les indicateurs, tandis qu'un deuxième fichier présente les résultats détaillés, c'est-à-dire les impacts de chaque étape du cycle de vie du bâtiment. Un schéma illustrant le fonctionnement de la Blackbox ACV est présenté à la Figure 2-3.

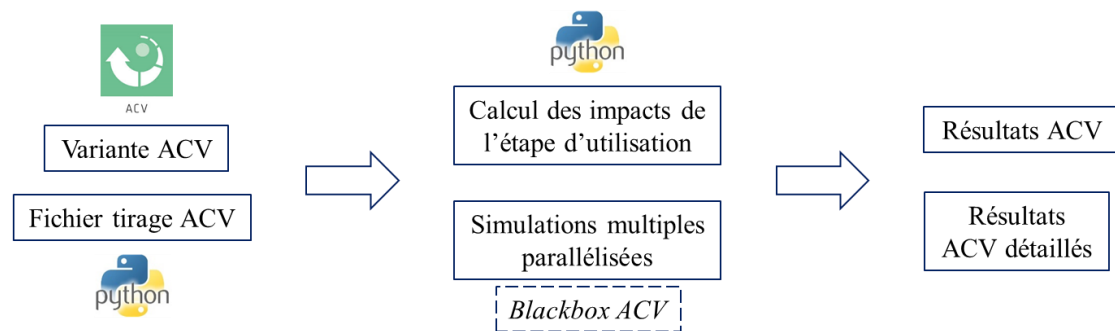


Figure 2-3 : Fonctionnement de la Blackbox ACV

Enfin, comme nous l'avons vu, les deux outils de simulation multiple sont nécessaires pour l'évaluation environnementale de nombreuses variantes de bâtiments ; le schéma Figure 2-4 illustre le fonctionnement global du couplage entre ces deux outils *Blackbox* pour la simulation des modèles de bâtiments créés sur Pleiades.

Il est tout de même important de mentionner le travail conséquent de la société Izuba pour intégrer l'ensemble des simulations STD et ACV au sein d'un même outil, le modelleur. Cet important changement d'organisation du logiciel est notamment motivé par la mise en place de la RE2020 qui intègre le caractère obligatoire de l'ACV et implique son implémentation dans le modelleur. Lorsque l'intégralité de l'outil Pleiades ACV sera implémenté dans le modelleur, toutes les données relatives à l'ACV seront intégrées au modèle du bâtiment et la simulation multiple ne devrait plus nécessiter les deux outils séparés que sont les *Blackbox STD* et *ACV*, il faudra alors créer un nouvel outil effectuant les deux calculs simultanément. Cela permettrait d'ajuster automatiquement les quantitatifs de matériaux lors de la variation des surfaces de fenêtres, et les besoins thermiques pourraient également être automatisés entre les simulations multiples STD et ACV. Cependant, le degré de liberté actuel provenant du calcul python des impacts environnementaux de l'utilisation du bâtiment pourrait être réduit, le travail nécessitera une réflexion afin de ne perdre aucun développement.

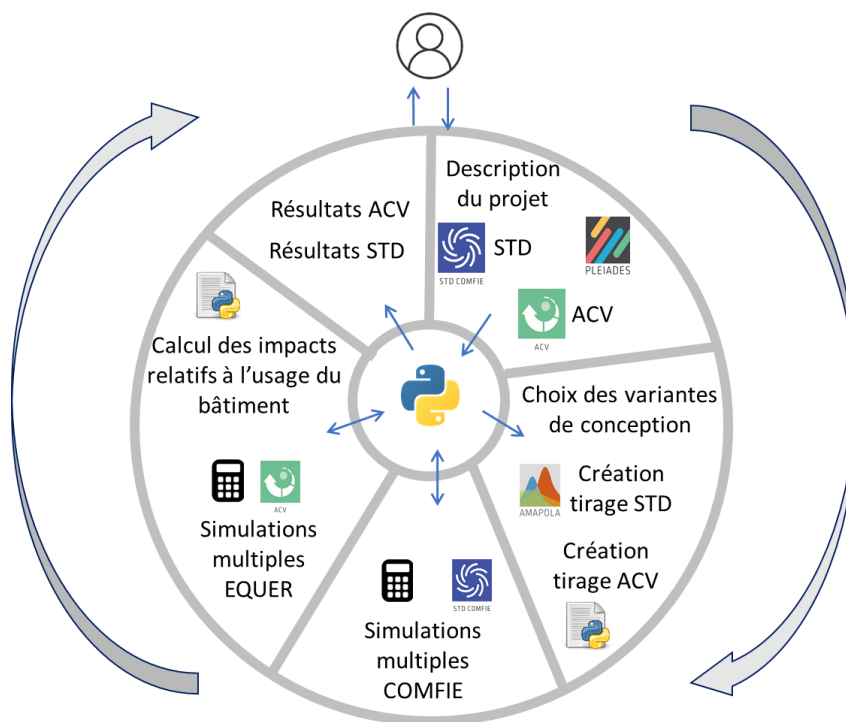


Figure 2-4 : Fonctionnement de la simulation multiple sur Pleiades

2.1.3 Méthode d'allocation des impacts en fin de vie

De nombreuses méthodes d'allocation relatives à la fin de vie des matériaux et à la gestion des déchets existent dans la littérature, comme présenté dans l'état de l'art de cette thèse. Il s'agit désormais de choisir la méthodologie qui semble la plus pertinente pour répondre aux objectifs de prise en compte de la valorisation. Tout d'abord, cette dernière doit pouvoir être comptabilisée au début et à la fin du cycle de vie du bâtiment, afin de ne pas avantager un projet par rapport à l'autre. En effet, la prise en compte du recyclage en fin de vie du bâtiment est parfois remise en question du fait de la longue durée de vie de ce dernier et des incertitudes que cela engendrerait. Cependant, tenir compte uniquement du recyclage en début de vie du bâtiment impliquerait de ne pas encourager le recyclage des matériaux en fin de vie, ce qui serait incohérent car réduirait également la possibilité d'utiliser des matériaux issus du recyclage en début de vie. D'autre part, un projet d'aménagement peut comporter une première étape de rénovation voire de déconstruction : dans ce cas certains impacts de fin de vie ont lieu rapidement et non au terme d'une durée de vie longue, donc les incertitudes sont limitées. Un deuxième point primordial est d'éviter le double comptage : le recyclage, la réutilisation et la valorisation évitent de créer de nouveaux impacts lors de la fabrication du matériau, et ces derniers doivent être pris en compte dans les projets. Or l'impact bénéfique d'un matériau recyclé en fin de vie d'un bâtiment et utilisé dans un nouveau projet ne peut pas être comptabilisé deux fois ; il s'agit alors de définir une règle d'allocation entre les deux projets pour le bénéfice de cet impact positif. Enfin, la méthode doit prendre en compte les impacts évités en fonction du produit substitué et de la durée de vie du produit recyclé.

La méthode qui semble la plus appropriée pour répondre à ces objectifs est la méthode 50/50 car elle comptabilise les impacts évités au début et à la fin du cycle de vie en évitant le double comptage. L'impact évité par le recyclage à 100 % d'un produit correspond à l'impact de la fabrication du produit neuf et de son traitement en fin de vie, auxquels on soustrait l'impact du procédé de recyclage :

$$I_{\text{évité}} = I_{\text{neuf}} + i \times I_i + d \times I_d - I_{\text{recyclage}} \quad (2.1)$$

Avec I_i et I_d correspondant respectivement à l'impact relatif à l'incinération et à la mise en décharge, et i et d représentant respectivement la proportion incinérée et mise en décharge.

L'implémentation de la méthode 50/50 à la comptabilisation de l'impact évité implique de réduire de moitié ce dernier. Les impacts de la phase de fabrication et de traitement après usage sont présentés par les équations (2.2) et (2.3). Les coefficients r_f et r_t correspondent respectivement à la proportion valorisée en phase de fabrication et de traitement après usage.

$$I_{\text{fabrication}} = I_{\text{neuf}} - \frac{r_f \times I_{\text{évité}}}{2} \quad (2.2)$$

$$I_{\text{traitement}} = i \times I_i + d \times I_d - \frac{r_t \times I_{\text{évité}}}{2} \quad (2.3)$$

Enfin, dans le cas du réemploi, la durée de vie du produit réemployé est moindre, on ajoute alors un coefficient prenant en compte la durée de vie plus faible du matériau réutilisé que s'il avait été neuf :

$$I_{\text{évité}} = I_{\text{neuf}} \times r_{DV} + i \times I_i + d \times I_d - I_{\text{recyclage}} \quad (2.4)$$

Le coefficient r_{DV} est le rapport entre la durée de vie du produit réutilisé et celle du produit neuf. La durée de vie du produit réutilisé est supposée correspondante à la somme de la durée de réutilisation en début de vie et en fin de vie du projet (i.e. la durée de réutilisation dans le projet actuel et dans le prochain bâtiment).

Cette méthode a été appliquée à un cas d'étude afin de comprendre les enjeux de la valorisation des déchets et plus globalement de l'économie circulaire. Cette étude a été effectuée dans le cadre du projet Pulse-Paris réalisé pour le compte de l'Ademe par Pawlak et al. (2020). Le projet d'aménagement de l'ancien hôpital saint Vincent de Paul à Paris comprend la rénovation de certains bâtiments, et la démolition et la construction d'autres, il est donc adéquat pour comprendre les enjeux de la réutilisation et du recyclage. L'ancien hôpital situé dans le 14^e arrondissement de Paris est transformé en vue de créer entre autres des logements et des commerces. Plusieurs bâtiments ont été sélectionnés, dont quatre îlots, et nous présenterons dans cette partie les résultats environnementaux de l'un d'entre eux, comprenant des constructions neuves. Quatre scénarios de traitement de la fin de vie des éléments ont été désignés, le premier correspond à la variante de base, tous les matériaux sont neufs et sont considérés être mis en décharge ou incinérés en fin de vie. Le scénario 2 inclut des pratiques courantes de revalorisation telles que l'usage de 40 % de métaux recyclés en construction et leur recyclage en fin de vie à hauteur de 90 %, l'utilisation de matériaux de gros œuvre (minéraux et bois) neufs en construction, revalorisés à

Chapitre 2. L'ACV à l'échelle d'un projet urbain

hauteur de 70 % en fin de vie, ou encore l'installation de panneaux en bois OSB et de plaques de plâtre neufs en construction, et recyclés respectivement à hauteur de 90 % et de 70 % en fin de vie. Le troisième scénario reprend le scénario 2 avec les mêmes hypothèses de fin de vie mais en ajoutant une part plus importante de revalorisation en phase de construction, comme 30 % de gravier recyclé pour les éléments en béton, 30 % de briques et d'éléments de gros œuvre en bois, et 50 % de pierres calcaires issus du réemploi. Le quatrième scénario reprend le troisième avec des taux de recyclage et de réemploi plus importants en fin de vie, soit 90 % de recyclage du béton, des pierres calcaires, des briques ou encore des éléments en bois du gros œuvre. Les quatre scénarios et la composition des bâtiments sont détaillés en Annexe A.

La performance environnementale de cet îlot a été évaluée selon les différents scénarios à l'aide de Pleiades ACV, à travers onze indicateurs qui sont illustrés Figure 2-5. On observe une faible différence entre les scénarios sur l'indicateur du changement climatique, malgré l'absence d'économie circulaire dans la référence, et d'autre part l'intégration de scénarios d'économie circulaire conséquents dans les autres scénarios. En effet, sur cet indicateur les impacts de l'étape d'utilisation du bâtiment sont bien plus importants. On en déduit que l'économie circulaire peut réduire l'impact carbone d'un bâtiment mais qu'elle n'est pas suffisante. Les étapes de construction et de fin de vie, bien qu'elles comprennent la gestion de ressources en grande quantité, restent courtes dans le temps par rapport à la durée de vie du bâtiment. Des efforts doivent impérativement être effectués en parallèle sur la réduction des impacts de la longue étape d'utilisation. Les bénéfices de l'économie circulaire ne sont pas bien représentés par l'impact carbone, mais sont visibles au niveau global, en particulier concernant l'épuisement des ressources, l'eutrophisation, les dommages sur la santé humaine et à la biodiversité, et les déchets produits, ces derniers pouvant être réduits considérablement grâce à la prise en compte de mesures conséquentes d'économie circulaire. La différence est d'autant plus visible entre le scénario 1, ne comprenant pas d'économie circulaire, et les autres. Ainsi, il y a un intérêt à revaloriser les ressources en déconstruction, au moins jusqu'aux proportions prévues par les normes, représentées par le scénario 2, mais dans la mesure du possible également en construction pour les éléments présents en grande quantité.

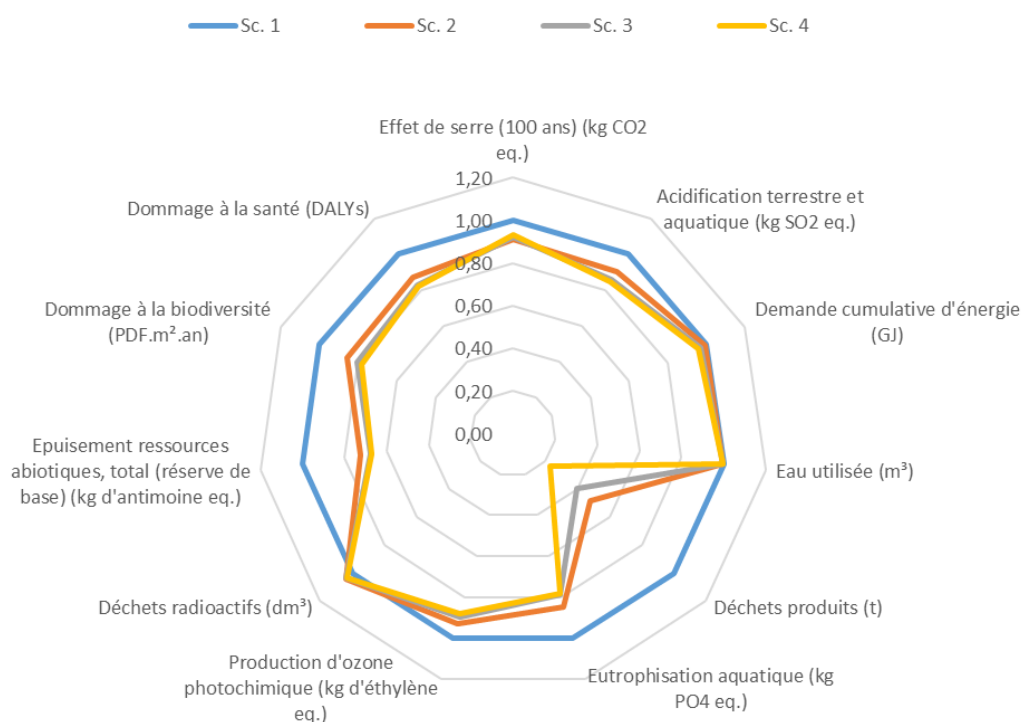


Figure 2-5 : Profil de performance de l'îlot en fonction des différents scénarios (Pawlak et al., 2020)

2.1.4 Évolution de la base de données

2.1.4.1 Méthodes implémentées

Un récent travail de mise à jour des méthodes de la base de données a été effectué au sein de l'équipe de recherche (Frossard et Peuportier, 2021). Les trois méthodes récentes d'évaluation des impacts présentées en état de l'art ont été implémentées dans la base de données. Il s'agit des méthodes suivantes :

- Environmental footprint 2.0, basée sur les recommandations de l'ILCD (European Commission, 2021) ;
- ImpactWorld+, méthode régionalisée permettant de calculer les dommages à court terme et à long terme (Bulle et al., 2019) ;
- ReCiPe, méthode déclinée selon trois horizons temporels (à court, moyen et long terme) (Huijbregts et al., 2017).

Les méthodes ImpactWorld+ et ReCiPe permettent de calculer les potentiels dommages des trois aires de protection c'est-à-dire les dommages à la santé, à la biodiversité, et aux ressources ainsi que les indicateurs intermédiaires midpoint. Les deux méthodes se différencient de par la régionalisation des données et par les catégories d'impact considérées dans les potentiels dommages à la santé humaine et à la biodiversité, résumées dans le Tableau 2-2.

Chapitre 2. L'ACV à l'échelle d'un projet urbain

La méthode ReCiPe est cependant utilisée pour les études ACV présentées dans ce manuscrit car ImpactWorld+ nécessite une procédure de régionalisation qui n'a pas pu être mise en œuvre. De plus, il est conseillé d'utiliser les impacts de niveau endpoint pour faciliter la compréhension des utilisateurs et permettre une vision globale de l'impact des projets, mais certains indicateurs de niveau midpoint et de flux peuvent également être utiles pour l'aide à la décision. La base de données EQUER intègre donc l'indicateur midpoint de changement climatique à horizon 100 ans, et la demande cumulative d'énergie, l'eau utilisée, les déchets produits ainsi que les déchets radioactifs. Les détails de ces méthodes sont présentés dans le Tableau 2-3, complétés par les caractéristiques des méthodes des deux indicateurs orientés dommages.

Tableau 2-2: Catégories d'impact considérées au niveau endpoint dans Impact World+ et ReCiPe

Aire de protection	Catégories <i>endpoint</i> d'Impact World+	Catégories <i>endpoint</i> de ReCiPe 2016
Qualité des écosystèmes	Eutrophisation aquatique et marine	Eutrophisation aquatique et marine
	Acidification terrestre, aquatique et marine	Acidification terrestre
	Écotoxicité aquatique	Écotoxicité aquatique, terrestre et marine
	Radiation ionisante	Changement climatique, terrestre et aquatique
	Changement climatique	Occupation des sols
	Occupation des sols	Transformation des sols
	Transformation des sols	Ozone photochimique, terrestre
	Pollution thermique marine	Disponibilité en eau, écosystèmes terrestre et aquatique
	Disponibilité en eau, écosystèmes terrestre et aquatique	
Santé humaine		Changement climatique
		Destruction de la couche d'ozone
		Ozone photochimique
		Radiation ionisante
		Effets respiratoires
		Effets cancérigènes
		Effets non-cancérigènes
		Disponibilité en eau

Tableau 2-3: Méthodes de caractérisation des indicateurs environnementaux sélectionnés

Indicateur	Méthode	Unité	Source
Effet de serre (100 ans) : Changement climatique, total	IPCC 2013 : climate change GWP 100a	kg CO ₂ eq.	(IPCC, 2013)
Demande cumulative d'énergie : Consommation totale d'énergie primaire	CED : fossils and renewables	MJ	(Hischier et al., 2010)
Eau utilisée : Utilisation nette d'eau douce	données d'inventaire	m ³	Manuel d'utilisation EQUER
Déchets produits : Déchets éliminés, total	données d'inventaire	kg	Manuel d'utilisation EQUER
Déchets radioactifs : Déchets radioactifs éliminés	données d'inventaire	kg	Manuel d'utilisation EQUER
Dommages à la biodiversité	ReCiPe	PDF.m ² .an	(Huijbregts et al., 2017)
Dommages à la santé humaine	ReCiPe	DALY	(Huijbregts et al., 2017)

Les dommages à la biodiversité sont représentés par la fraction d'espèces disparues sur un m² et sur une année, et les dommages à la santé humaine sont comptabilisés sous forme de DALY (Disability Adjusted Life years), c'est-à-dire le nombre d'années en bonne santé perdue (Murray et Lopez, 1996).

2.1.4.2 Carbone biogénique

Le bois et plus largement les végétaux absorbent du carbone au cours de leur croissance à travers le procédé de photosynthèse, on présente parfois les arbres comme des puits de carbone, car ils ont besoin d'absorber du CO₂ pour pousser. Cela permet d'atténuer temporairement le réchauffement climatique, mais comme présenté dans l'état de l'art de cette thèse, il existe plusieurs méthodes d'évaluation, dont le calcul ne fait pas toujours consensus dans la communauté scientifique. Le bois, utilisé au cours du cycle de vie du bâtiment comme matériau de construction ou comme production de chaleur, contient une quantité de carbone qui aurait été présente dans l'atmosphère si l'arbre n'avait pas existé. On choisit alors de comptabiliser le bénéfice du bois s'il provient d'une forêt dont la gestion durable est certifiée, car cela signifie que la coupe de l'arbre fait place à la croissance d'un nouvel arbre qui absorbera à son tour du carbone au cours de sa croissance. D'autre part, le traitement en fin de vie du bois émet une certaine quantité de gaz à effet de serre, qui est également comptabilisée dans son cycle de vie. Ainsi, si du bois issu d'une forêt certifiée est incinéré en fin de vie, l'impact de son cycle de vie sur le changement

Chapitre 2. L'ACV à l'échelle d'un projet urbain

climatique est proche de zéro, mais s'il est mis en décharge¹ alors il continue de stocker sa part de carbone et son impact carbone est négatif.

La base de données ecoinvent ne prend pas en compte le bois provenant de forêts certifiées, il convient donc d'implémenter un calcul supplémentaire dans la base de données EQUER pour intégrer le raisonnement précédent dans l'évaluation environnementale des bâtiments avec Pleiades ACV. Les données ecoinvent indiquent qu'un kg de bois contient 0,412 kg de carbone sur masse humide. Cette quantité, ramenée en équivalent CO₂ revient à 1.51 kgCO₂eq. stockés dans un kg de bois. Il s'agit alors de soustraire cette valeur à l'impact sur le changement climatique de l'utilisation d'un kg de bois issu d'une forêt certifiée, l'impact de fabrication devient donc négatif.

Tous les éléments contenant du bois ou des végétaux sont concernés par le bénéfice du stockage de carbone au cours de la croissance de l'élément, s'il est certifié. Les fiches environnementales de la base de données EQUER concernées sont les fenêtres et les portes en bois, la laine de bois, les plaques de liège et de bois collés. L'incinération du bois émet à son tour du carbone dans l'atmosphère, 1 kg de bois incinéré émet 1,46 kg CO₂eq. Les fiches environnementales de fin de vie des éléments contenant du bois sont ainsi modifiées, ce qui permet de prendre en compte de manière globale et cohérente l'impact carbone du bois et de mettre en évidence l'influence du traitement effectué en fin de vie.

La prise en compte du carbone biogénique permet d'améliorer la base de données et encourage ainsi l'utilisation du bois provenant de forêts certifiées. La réduction de l'impact carbone est un enjeu extrêmement important qui doit être traité de façon urgente, mais les autres aspects environnementaux ne doivent tout de même pas être négligés : comme pour chaque élément, l'évaluation environnementale doit être multicritère. L'utilisation du bois, particulièrement du bois certifié, présente un impact nul ou négatif sur le changement climatique, mais l'impact sur l'utilisation des sols par exemple est conséquent. La réalisation d'une ACV multicritère permet de prendre en compte l'ensemble des impacts des éléments, sur les trois aires de protections qui sont les dommages à la santé, à la biodiversité, et l'épuisement des ressources.

Enfin, la valorisation du stockage de carbone dans le bois certifié peut engendrer des contradictions sur les préconisations concernant le recours à la réutilisation et au recyclage des produits du bâtiment dans le cadre de l'économie circulaire. Ces procédés évitent les impacts provenant de la fabrication de l'élément en question, or les impacts de fabrication du bois sont négatifs. Le fait de soustraire les impacts de fabrication du bois revient à augmenter l'impact de la réutilisation du matériau. Ce raisonnement est illustré par le cas d'étude utilisé dans la partie 1.3 de ce document et présenté en Annexe A. Il comprend une grande partie de bois certifié notamment dans les planchers intermédiaires, dont l'impact carbone est présenté dans l'encadré Figure 2-6. L'impact de fabrication des planchers intermédiaires est négatif,

¹ Dans la mesure où il s'agit d'un dispositif de stockage à long terme, évitant en particulier l'émission de méthane dans l'atmosphère.

la performance sur l'effet de serre est donc dégradée lorsqu'il y a une part de bois revalorisée en construction, c'est pourquoi les scénarios 3 et 4 ont un impact supérieur aux deux premiers scénarios, ne comprenant pas de bois valorisé en construction. Du point de vue du carbone biogénique, il vaut mieux utiliser du bois certifié et le stocker durablement en fin de vie plutôt qu'utiliser du bois recyclé qui ne permet pas d'absorber de nouveau du CO₂.

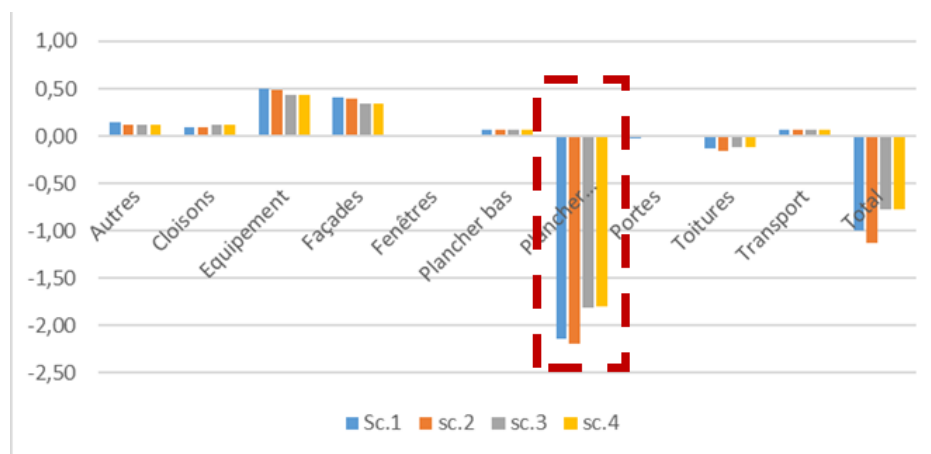


Figure 2-6 : Impact de l'étape de construction des bâtiments, par lot, sur le changement climatique (kg CO₂eq./m²/an) (Pawlak et al., 2020)

2.1.4.3 Ajout de fiches environnementales

La base de données EQUER évolue en fonction des projets développés au sein de l'équipe de recherche. En effet, les matériaux, équipements et procédés couramment utilisés lors de la réalisation des analyses de cycle de vie des bâtiments y sont implémentés, et les projets de recherche d'écoconception des bâtiments apportent de nouvelles notions qu'il convient d'évaluer, ce qui implique d'ajouter de nouvelles fiches environnementales fréquemment.

Un premier exemple est un projet réalisé en partenariat avec l'entreprise Cubik-Home dans le cadre du programme Recherche & solutions du lab recherche environnement VINCI ParisTech. Il s'agissait d'évaluer le potentiel de la construction hors-site pour la réduction des impacts environnementaux des bâtiments. L'analyse des impacts a fait émerger une première idée d'amélioration du projet, consistant à utiliser du béton bas carbone. Le ciment le plus couramment utilisé, nommé CEM I est constitué en très grande majorité (minimum 95 %) de clinker, mélange à partir duquel les propriétés de liant hydraulique du ciment sont obtenues. Ce mélange comprenant 80 % de calcaire et 20 % d'argile est porté à très haute température puis broyé et émet de grandes quantités de gaz à effet de serre, provenant de la carbonatation du calcaire lors de la cuisson du mélange, et de la cuisson elle-même. La volonté de réduire l'impact carbone du ciment a mené à l'utilisation d'un nouveau ciment, réduisant considérablement la proportion de clinker en la remplaçant par d'autres constituants tels que des cendres volantes, de pouzzolanes ou encore de la fumée de silice. Ce ciment est appelé CEM II. Enfin, le CEM

Chapitre 2. L'ACV à l'échelle d'un projet urbain

III contient une grande quantité de laitier de haut fourneau, co-produit issu de la fabrication de l'acier. Ces trois types de ciment, CEM I, II et III ont ainsi été implémentés dans la base de données EQUER afin d'évaluer la réduction d'impact potentielle relative au changement de béton pour ce projet. Il semble tout de même intéressant de mentionner le conflit existant entre les professionnels du bâtiment concernant l'allocation des impacts de la fabrication du laitier. Cet élément étant un co-produit, certains sont d'avis de ne comptabiliser aucun impact car il constitue un déchet de la fabrication de l'acier, mais étant donné qu'il est tout de même utilisé, une autre opinion considère que les impacts de l'usine de fabrication doivent être répartis entre les quantités d'acier et de laitier produits.

Un second projet de recherche a nécessité d'élargir le champ d'action de la base de données EQUER ; il s'agissait d'analyser l'influence de la fabrication et de l'utilisation des ascenseurs ainsi que de l'alimentation des occupants sur les impacts environnementaux globaux d'un bâtiment. Les constituants des ascenseurs n'étaient initialement pas intégrés à la base de données, les fiches de fabrication de l'acier inoxydable et de l'électronique ont été ajoutées, ainsi que la fiche environnementale du traitement en fin de vie de l'électronique. Concernant l'alimentation, le panier alimentaire moyen d'un français a été déterminé au cours du projet, les fiches environnementales des aliments compris dans ce panier ont été ajoutées à la base de données, comme l'impact de la production de lait, de beurre, de blé ou encore de certains fruits et légumes. Le transport des aliments dans des camions réfrigérés a également été intégré à la base de données EQUER.

2.1.5 Pré-dimensionnement de la structure

La conception paramétrique présentée dans l'état de l'art consiste notamment à faire varier les paramètres de forme des bâtiments. Or la forme architecturale influence le dimensionnement de la structure des bâtiments, la quantité de matériaux structurels peut alors considérablement varier d'une proposition à l'autre, ce qui influencerait également la prise de décision lors de la comparaison de variantes environnementales. Cependant, deux contraintes principales se distinguent ; d'une part, l'ACV des bâtiments doit être effectuée en phase amont des projets pour avoir un réel impact sur la prise de décisions, mais à ce stade les données nécessaires au dimensionnement de la structure, comme l'étude de la qualité du sol ou le choix du mode de construction du bâtiment, ne sont pas encore connues. D'autre part, le développement d'un outil de comparaison environnementale des bâtiments nécessite des connaissances en thermique des bâtiments et en analyse de cycle de vie, tandis que le calcul de dimensionnement de structure est maîtrisé par d'autres acteurs. Afin d'intégrer tout de même l'influence de la structure à notre outil d'aide à la décision, nous proposons de répondre à ces problématiques en tirant parti d'un projet effectué en partenariat avec l'école des Ponts, proposant un pré-dimensionnement de la structure (Mendes, 2022). Ce dernier n'est pas voué à être précis car il sera évidemment complété par les calculs de dimensionnement de la structure au cours du projet de conception, mais donnera un

ordre de grandeur des impacts des matériaux structurels afin de réaliser au mieux la comparaison de variantes de bâtiments de différentes formes dès la phase amont des projets.

Le bâtiment n'étant généralement pas un produit provenant d'une chaîne de production, chaque bâtiment est généralement unique, ce qui rend nécessaire la réalisation d'une étude spécifique à chaque projet. De plus, il est important d'étudier les pratiques courantes pour faire des hypothèses de dimensionnement au plus proche de la réalité. Pour ces deux raisons, cet outil a été élaboré à partir des données de la littérature présentant une base de données d'éléments structurels de 200 bâtiments (De Wolf et al., 2016), complétées par des données accessibles de bâtiments existants. Il propose un quantitatif de matériaux structurels variant selon le nombre d'étages du bâtiment.

La structure peut être décomposée en trois éléments : la superstructure, l'infrastructure et les fondations. La superstructure est la partie hors sol du bâtiment, l'infrastructure la partie souterraine et les fondations correspondent aux éléments en contact avec le sol par lesquels la structure lui transmet les efforts qui s'exercent sur elle. Différents types de superstructure se distinguent, d'une part par le matériau de construction, généralement le béton, l'acier ou le bois, et d'autre part, par le type de structure. Les structures en béton armé comprennent deux principaux types qui seront détaillés ici : les structures à ossature et à paroi. La structure à ossature est composée d'éléments structurels linéaires (poteaux, poutres) sur lesquels viennent se fixer des éléments surfaciques ou des planchers non porteurs. Ce type de structure est particulièrement utile aux bâtiments nécessitant des grands espaces sans cloisons, comme les bureaux, et permet notamment d'installer des parois entièrement vitrées favorisant la lumière naturelle pour le confort visuel. La structure à parois est composée d'éléments structurels surfaciques (parois, planchers), elle est souvent sélectionnée pour les immeubles de logements car elle permet de séparer les logements par des murs porteurs en béton armé ; cependant l'application à un immeuble de grande hauteur impliquerait une quantité importante de béton, on privilégie alors ce type de structure pour les immeubles de faible et de moyenne hauteur (Mendes, 2022).

Ainsi, le type de structure est un paramètre important à prendre en compte pour estimer la quantité de matériaux structurels en fonction du nombre d'étages. Ce paramètre influence également le dimensionnement des fondations qui dépend des efforts transmis par la structure aux fondations, et donc de la hauteur de l'immeuble. L'analyse des données accessibles de bâtiments existants montre une tendance concernant la quantité de béton nécessaire aux fondations en fonction du nombre d'étages. Cette dernière s'exprime en épaisseur équivalente, correspondant au rapport entre le volume de béton utilisé et la surface de plancher, pour un bâtiment à niveaux identiques. L'épaisseur équivalente diminue avec l'augmentation du nombre d'étages pour les immeubles de faible hauteur, puis augmente à partir de 12 étages du fait de l'augmentation des efforts transmis aux fondations dus notamment au vent. Cette tendance est illustrée Figure 2-7.

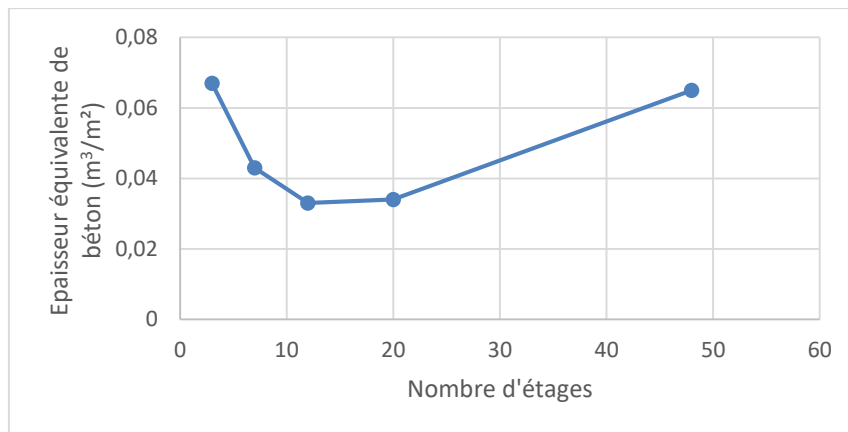


Figure 2-7 : Epaisseur équivalente de béton dans les fondations en fonction du nombre d'étages

La structure d'un bâtiment descend la charge des planchers, des poutres ou encore des poteaux jusqu'au sol, en plus de maintenir le bâtiment face aux effets du vent ; les efforts sont donc horizontaux et verticaux. Dans le cas des immeubles de grande hauteur, un noyau est généralement implémenté afin de solidifier la structure à ossature (poteaux, poutres) et de descendre les efforts latéraux jusqu'au sol, tout en permettant d'organiser l'usage du bâtiment de manière à concentrer les gaines et les ascenseurs et ainsi laisser un grand espace libre pour des bureaux. C'est le cas de la tour EDF à la défense, dont le plan d'un niveau est présenté Figure 2-8. La quantité de matériaux utilisée pour ce noyau est fonction du nombre d'étages, la quantité de béton armé mis en œuvre par unité de surface pour la superstructure augmente avec la hauteur de la tour. De plus, l'épaisseur équivalente des éléments verticaux est proportionnelle à l'épaisseur équivalente des éléments horizontaux, qui est donc un élément important à prendre en compte pour l'estimation des quantités de béton armé en fonction du nombre d'étages.

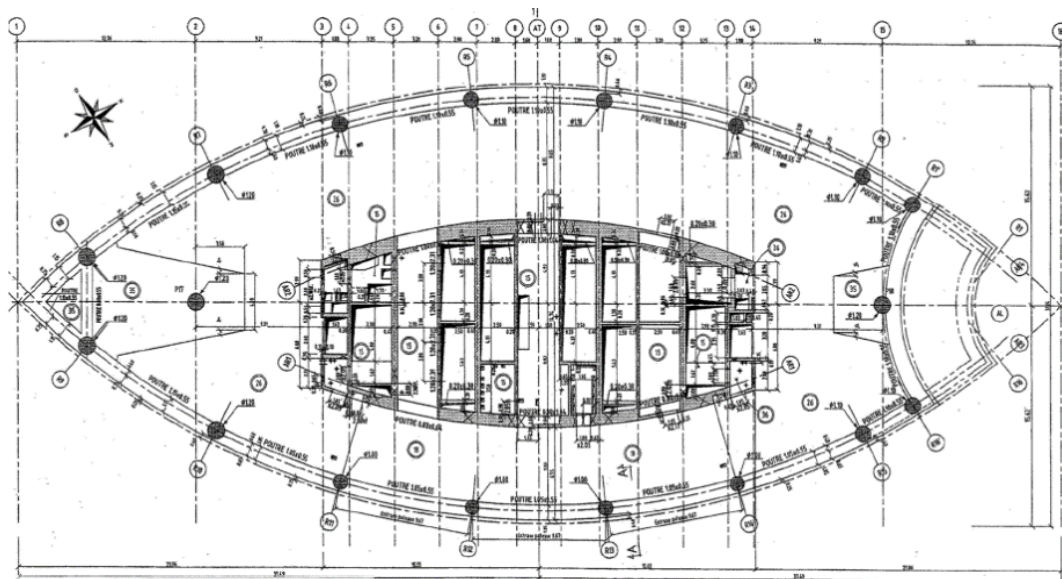


Figure 2-8 : Plan d'un niveau de la tour EDF de la défense

Enfin, la classe mécanique des bétons utilisés varie généralement avec le type de construction, des bétons à haute performance impliquant une bonne résistance mécanique peuvent être utilisés pour réduire la quantité de béton nécessaire, mais les coûts sont conséquents compte tenu de l'emploi important de ciment. Les bâtiments de grande hauteur nécessitent tout de même l'utilisation de béton à haute performance dans les étages inférieurs, afin de compenser les charges importantes, verticales telles que le poids propre de la structure, charges d'équipement, d'exploitation, et les charges horizontales liées au vent et les charges sismiques éventuelles.

L'analyse des constructions en bois montre une grande diversité des choix structurels de par la généralisation de la fabrication et l'existence de structure hybrides, mélangeant bois, béton et acier. Les quantités de matériaux utilisés dépendent plus des choix structurels que du nombre de niveaux ; il est donc important de différencier le type de structure dans le modèle de pré-dimensionnement, et de ne pas faire de généralisations inadaptées. Les différentes études mettent tout de même en évidence certaines pratiques usuelles. Les planchers bois sont complétés par une couche de béton de l'ordre de 4 cm d'épaisseur afin d'améliorer le niveau de confort acoustique et la performance au vent du bâtiment. Un rez-de-chaussée présentant une structure poteaux-dalles en béton armé est considéré afin d'y faire reposer la structure bois. Un double recouvrement en plaque de plâtre est installé sur les éléments bois afin d'assurer une résistance au feu. Enfin, l'épaisseur équivalente des planchers en bois est de l'ordre de 16 cm.

2.1.6 Modèle de système électrique dynamique

Le mix électrique utilisé ainsi que le moyen de chauffage ont une forte influence sur les consommations énergétiques et sur les impacts environnementaux associés. Un mix électrique ramené à une moyenne annuelle est très approximatif, ne tenant pas compte des variations temporelles de la demande d'énergie ni des technologies disponibles en temps réel. Nous avons utilisé dans ce projet un mix électrique prenant en compte la production horaire d'électricité en France. Il provient du modèle développé par Roux (2016), utilise les données météorologiques de la RT2012 et considère les capacités techniques de production d'électricité de l'année 2016. Le modèle a été validé pour l'année 2017 à l'aide d'une comparaison avec les données réelles (Frapin et al., 2022).

2.1.6.1 Fonctionnement du modèle

Le modèle de Roux (2016) est intégré à l'ACV des bâtiments, il fournit des données horaires du mix électrique pour une évaluation environnementale réaliste. Le modèle détaillé dans la thèse citée, considère trois composantes du bilan :

- La demande en électricité, qui correspond à la somme de la consommation nationale, des exportations d'électricité et de la consommation des stations de pompage, à laquelle on soustrait les importations.
- Les productions fatales dépendantes des conditions météorologiques comme l'énergie éolienne et photovoltaïque, ou des variables économiques telles que l'incinération des déchets. Ce type de production ne dépend pas de la demande en électricité, elle est « automatique » si les conditions sont rassemblées.
- Les productions modulables, dont on peut contrôler la production, ce qui permet de compléter la production fatale pour satisfaire la demande totale d'électricité. En France, cette production correspond au nucléaire, à l'hydraulique de barrage, à la production thermique fossile (charbon et gaz), au turbinage des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) et aux turbines à combustion.

La production fatale est tout d'abord modélisée et soustraite à la demande nationale en électricité, qui est ensuite ajustée en fonction des imports et des exports, et augmentée par la consommation due au pompage des STEP. Alors les productions modulables sont utilisées, en fonction de leur disponibilité et de leur coût pour satisfaire la demande résiduelle, comme illustré Figure 2-9.

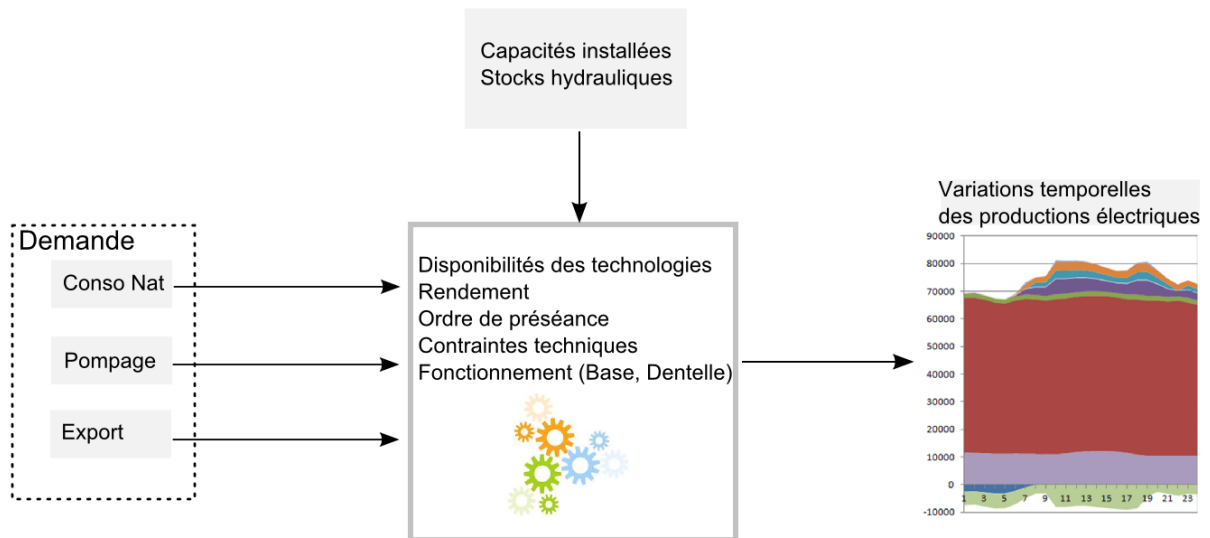


Figure 2-9 : Modélisation simplifiée de la production nationale d’électricité (Roux, 2016)

2.1.6.2 Modèle appliqué à l’année 2016

L’application du modèle aux capacités technologiques de l’année 2016 a permis d’obtenir les données horaires de production d’électricité en fonction des trois composantes décrites précédemment. La consommation moyenne annuelle d’électricité en France provenait à 76 % de centrales nucléaires et à 11 % de la production hydraulique. Cette dernière comprend l’électricité produite par les centrales au fil de l’eau (production fatale), les centrales de lac et d’écluse (production modulable). Les autres technologies intervenant dans le mix sont l’éolien, le photovoltaïque, l’ensemble renouvelable thermique (incinération de déchets ménagers et de papeterie, biogaz et biomasse), la cogénération gaz et fioul, la production centralisée de charbon et de gaz, les imports, le turbinage des STEP et enfin la production de pointe (centrales fioul et turbines à combustion). La répartition des technologies intervenant dans le mix électrique annuel est présentée à la Figure 2-10. Ce mix qui a été établi suivant l’approche attributionnelle sera implémenté dans un premier temps dans cette thèse, car les scénarios prospectifs de l’ADEME et RTE n’étaient pas encore disponibles ; une application intégrant un mix conséquentiel prospectif sera réalisée dans le chapitre 5 à titre de comparaison.

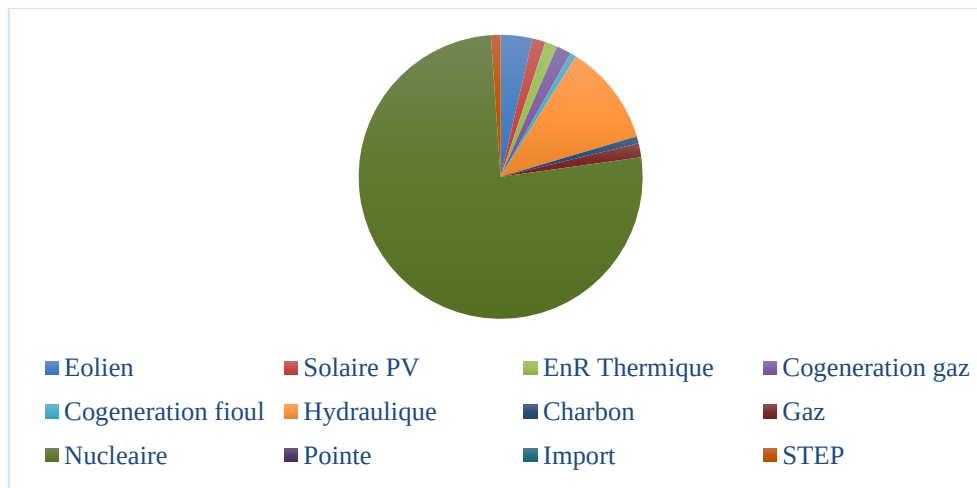


Figure 2-10 : Répartition des technologies de production d'électricité au cours de l'année 2016

Il est possible d'estimer l'ordre de sollicitation des différentes technologies, en respectant le type de production, fatale ou modulable selon l'approche marginale GHG-P, d'après le guide méthodologique du GHG Protocol (GHG Protocol, 2007). Le coût des technologies intervient également dans leur classement. L'ordre de sollicitation, basé sur les données de l'année 2016 est présenté Figure 2-11.

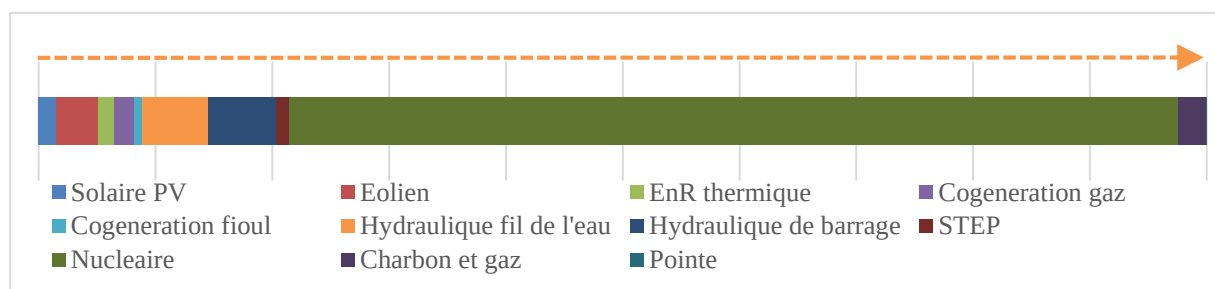


Figure 2-11 : Ordre de sollicitation des technologies de production

Le modèle de Roux (2016) contient également une approche marginale dérivée qui permet d'établir un mix dynamique conséquentiel. Il s'agit des technologies « à la marge », disponibles et capables de satisfaire la demande marginale. La technologie principale de production est le nucléaire, suivi par le gaz et le charbon. La répartition est illustrée Figure 2-12.

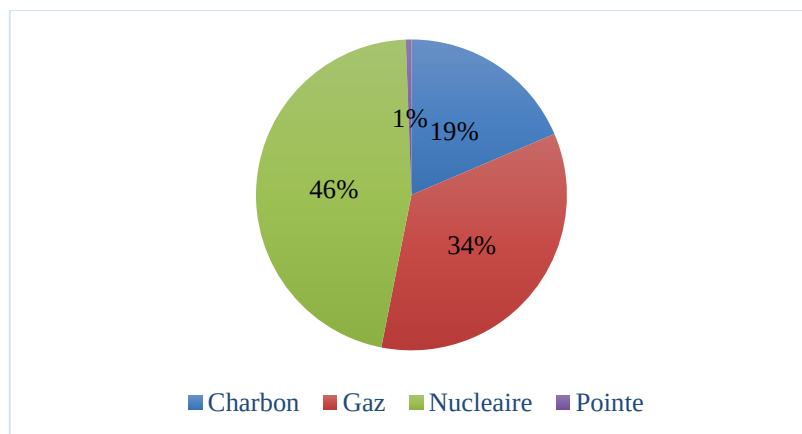


Figure 2-12 : Répartition des technologies de production d'électricité marginale en 2016

2.2 Les référentiels de performance comme aide à la décision

La méthode de l'analyse de cycle de vie est propice à l'évaluation environnementale des projets mais les résultats sont difficiles à interpréter sans référence auxquelles les comparer. En effet, afin d'éviter au maximum le déplacement d'impact, l'ACV considère plusieurs indicateurs environnementaux. Ces derniers peuvent être nombreux, et les parties prenantes n'ont pas toutes les compétences requises à la compréhension et à l'interprétation des impacts environnementaux. Une aide à cette évaluation est alors proposée à travers l'élaboration d'un référentiel de performance pour plusieurs indicateurs environnementaux.

Sur le principe des étiquettes énergétiques existantes, différents niveaux d'impacts environnementaux sont répertoriés et classés sur une échelle de A à G. L'étude est effectuée sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments, et se base sur des échantillons pour trois types de bâtiments : logements individuels, collectifs et bâtiments de bureaux. Les résultats se présentent sous forme d'étiquettes environnementales pour les douze indicateurs environnementaux présentés au paragraphe 1.2.2.2 tels que l'énergie primaire, les émissions de GES et les impacts sur la santé et la biodiversité. Le but de l'étude est de divulguer des ordres de grandeur afin d'aider les concepteurs à évaluer la performance environnementale de leur projet, en leur présentant notamment les impacts des pires et des meilleures pratiques.

2.2.1 Méthodologie

Trois types de bâtiments ont été choisis pour mener à bien cette étude : les logements individuels, collectifs et les bâtiments de bureaux. Des bâtiments existants ont été sélectionnés avec des

Chapitre 2. L'ACV à l'échelle d'un projet urbain

caractéristiques variées afin d'obtenir un large intervalle de performances. Il s'agit par exemple de bâtiments avec une forte épaisseur d'isolation, du double ou triple vitrage, des panneaux photovoltaïques et situés à Nice, ou à l'inverse, non ou mal isolés, avec uniquement du simple vitrage et situés à Trappes. Ils sont référencés dans le Tableau 2-4.

Tableau 2-4 : Caractéristiques des bâtiments choisis pour établir les références environnementales

	Logements individuels	Logements collectifs	Bâtiments de bureaux
Bonnes pratiques	Maison à énergie positive, 2018	Immeuble résidentiel à basse consommation, 2016	Bureaux à haute performance énergétique, 2015
Cas défavorables	Maison non isolée, 1950	Bâtiment Haussmannien non rénové, 1880 HLM non rénové, 1960	Variante dégradée, sans isolation ni système PV

Dans un premier temps, plusieurs variantes d'ACV de ces bâtiments ont été effectuées pour générer des simulations de bâtiment avec des performances environnementales extrêmes. Pour un même bâtiment, on a comparé différentes structures (béton, bois ou pierre, selon les bâtiments), moyens de production de chauffage (électricité, gaz ou bois) et la présence ou non de panneaux photovoltaïques. Des références ont ainsi pu être établies pour la meilleure et la pire classe environnementale des projets ; la valeur déterminant le label A correspond au plus faible impact obtenu entre toutes les simulations du même échantillon, et le label G à l'impact sur l'environnement le plus conséquent.

Les étiquettes environnementales sont ensuite créées à l'aide d'une variation paramétrique couplée à l'ACV. Certains paramètres sont modifiés afin d'étendre l'échantillon à différents besoins de chauffage et matériaux de construction. Les simulations ont été effectuées à partir des outils de simulation thermique dynamique, d'optimisation et d'ACV du logiciel Pléiades développé, et un script Python similaire à celui présenté au paragraphe 2.1.2.2 a permis de lancer automatiquement de l'ordre de 20 000 simulations. Ces dernières fournissent en sortie une série d'impacts environnementaux pour chaque échantillon de bâtiments.

2.2.2 Résultats

Afin de créer chaque étiquette environnementale, de nombreuses simulations ont été lancées. Selon les variantes, on a pu faire varier l'épaisseur de l'isolation, le type de fenêtres ou la performance énergétique des portes.

Dans le cas des maisons individuelles, le label G est calculé sur la base d'une maison Phénix située en Ile-de-France. Cette dernière ayant une faible performance énergétique, les classes intermédiaires de

l'étiquette sont créées en améliorant progressivement la performance de la maison. Les variantes effectuées sur cette maison sont les suivantes :

Tableau 2-5 : Description des variantes de maisons individuelles pour la création des étiquettes environnementales

	Cas de base	Variation
Isolation des murs	2 cm	2, 5, 10, 15, 20 et 25 cm
Isolation du toit	4 cm	1, 4, 10, 15, 20, 25 et 30 cm
Type de fenêtre	Fenêtres simple vitrage	Fenêtres double et triple vitrage
Porte extérieure	Bois	Porte en bois très isolée

Cette variation paramétrique correspond à plus de 700 variantes qui sont générées par le script python couplé au logiciel Pléiades.

L'échantillon des logements collectifs a quant à lui été évalué par l'intermédiaire de trois bâtiments. Les variantes modifient le type des fenêtres et l'isolation des murs, des planchers et des plafonds. Enfin, les impacts environnementaux des bâtiments de bureaux ont également été calculés sur le même principe que les logements. Ces simulations ont permis d'obtenir des ordres de grandeur de représentation du parc existant, et par la suite nous avons créé des étiquettes environnementales pour les différents indicateurs. Les étiquettes représentant les émissions de GES des trois échantillons de bâtiments sont présentées sur la Figure 2-13.

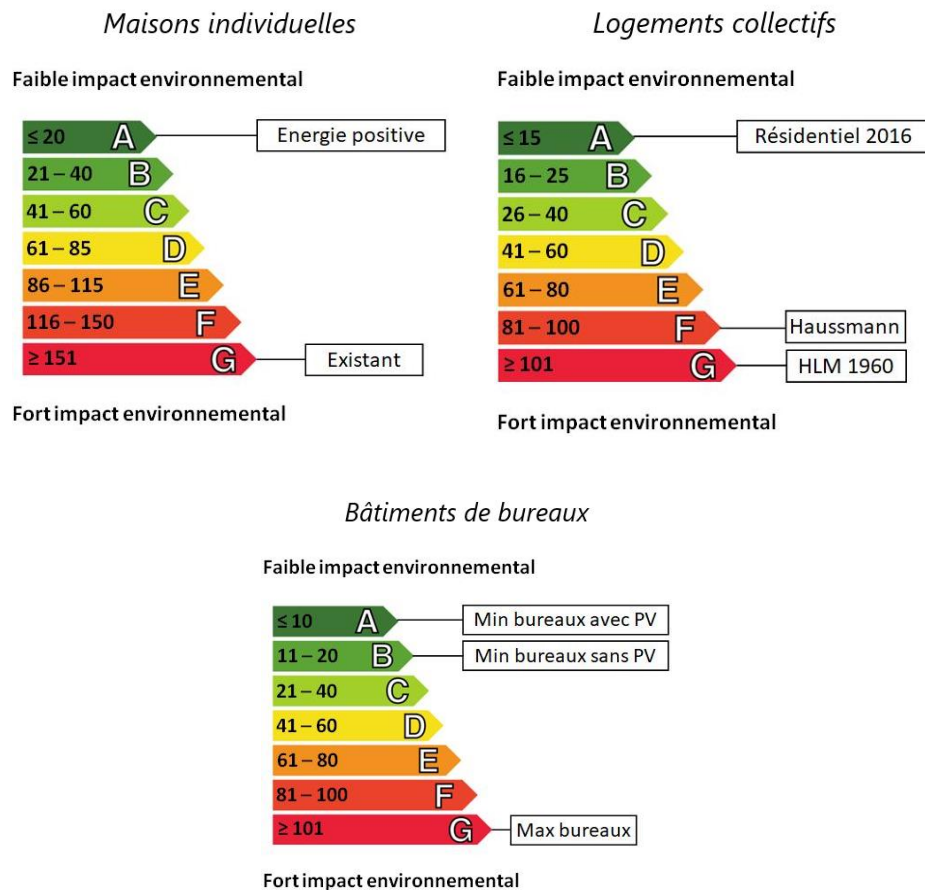


Figure 2-13 : Étiquettes environnementales de l'indicateur du changement climatique des maisons individuelles, des logements collectifs et des bureaux en kg CO₂ eq./m²/an

A titre d'exemple, un bâtiment tertiaire autrichien a été étudié dans le cadre de l'annexe 72 (Frischknecht et al., 2019). L'impact sur le changement climatique a été évalué à 15 kg CO₂ eq./m²/an émis dans les conditions françaises, ce qui correspond à la classe B.

Ces étiquettes environnementales sont très utiles lors de l'évaluation des projets et peuvent être adaptées aux quartiers. Lors de la conception d'un quartier, le concepteur définit dans ses objectifs le nombre de logements et de bureaux à construire avec les surfaces correspondantes. Il s'agit ensuite d'adapter ces étiquettes au ratio de logements et de bureaux pour évaluer la performance environnementale des projets.

Pour un quartier ayant pour objectif de créer 120000 m² de bureaux et 34000 m² de logements, la valeur maximale d'émissions de gaz à effet de serre pour appartenir à la classe A (classe correspondant à la meilleure performance environnementale) serait :

$$15 \times 34000 + 10 \times 120000 = 1710000 \text{ kg CO}_2/\text{an}$$

Soit 11 kg CO₂/m²/an sur l'ensemble des bâtiments.

2.3 Cas d'étude

2.3.1 Présentation du cas d'étude

Les travaux de cette thèse sont appliqués à un projet d'aménagement porté par Plaine Commune : le quartier des Lumières Pleyel, situé près du carrefour Pleyel à Saint-Denis (93). Le quartier devant accueillir dès 2023 la gare la plus importante du projet de réseau de transport public *Grand Paris Express*, le projet urbain nécessite d'être ambitieux en matière de mobilité et d'intermodalité, proposant des alternatives au transport individuel automobile par la mise en place de voies piétonnes et cyclables à proximité des transports en commun. Le projet prévoit de faire du quartier des Lumières Pleyel à la fois une porte d'entrée du Grand Paris Express et un symbole architectural fort témoin de la vitalité et de l'attractivité de la Région Capitale. De nombreux équipements seront situés à proximité immédiate du quartier, tels que le Village Olympique, le Centre Aquatique et le Stade de France, ce qui inscrit ce territoire au cœur d'une dynamique de projet.

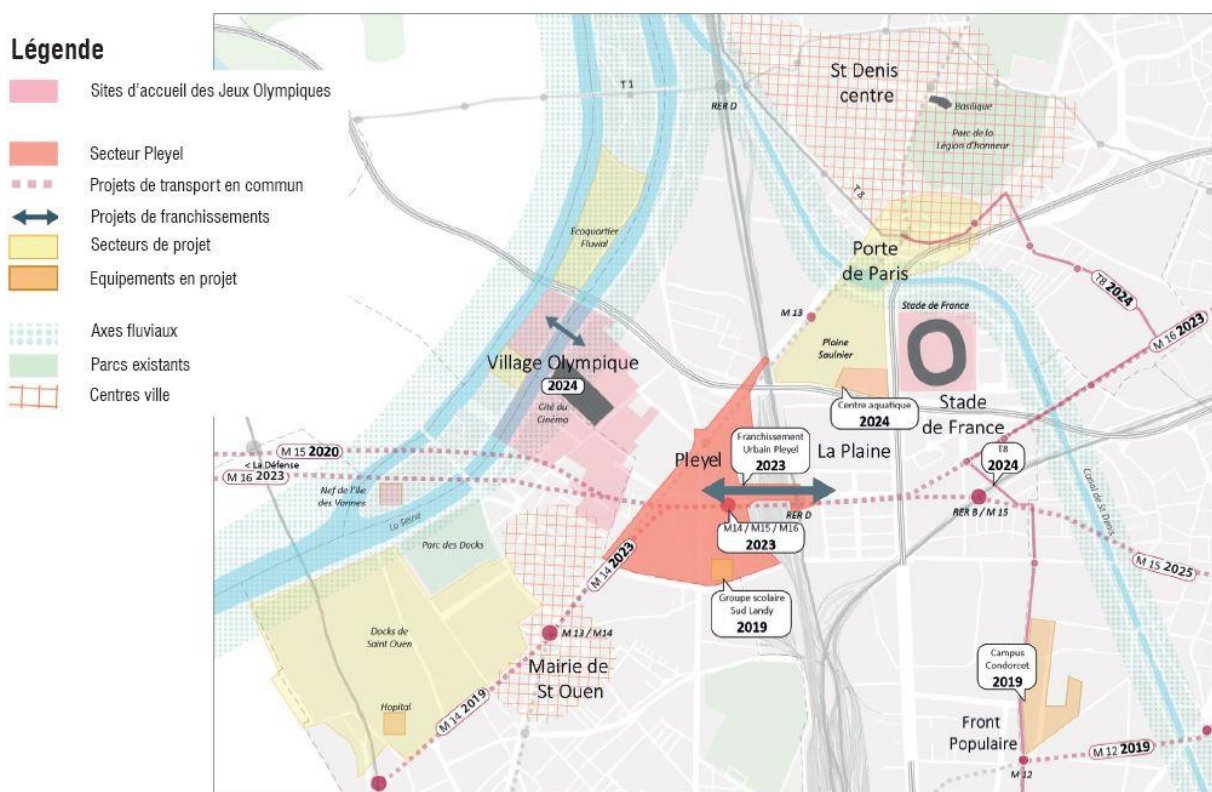


Figure 2-14 : Localisation des grands projets, source : UFV (2016)

Ce projet urbain comprend environ 5 hectares répartis dans un programme prévoyant les usages suivants :

- 120 000 m² de bureaux,

Chapitre 2. L'ACV à l'échelle d'un projet urbain

- 34 000 m² de logements,
- 5 000 m² d'hôtels
- 4 000 m² de résidences étudiantes
- 12 000 m² de commerces.

Il s'intègre donc pleinement dans l'objectif régional de densification de la première couronne parisienne. Le secteur est également un pôle d'emploi majeur de l'île de France, la programmation représente un potentiel d'environ 90000 emplois qui viendront s'ajouter aux 45000 salariés d'ores et déjà présents.



Figure 2-15 : Projection du quartier des Lumières et de la future gare du Grand Paris Express, Credits : Sogelym - Dixence

Le projet s'inscrit dans une ambition de qualité environnementale globale. Le quartier a pour objectif de se dessiner avec une approche bas carbone en s'appuyant notamment sur le déploiement d'un réseau de chaleur à l'échelle du Grand Pleyel. Le secteur souffre actuellement d'une carence en espaces verts ; il s'agira de reconquérir la nature en ville par la gestion alternative des eaux pluviales et la végétalisation des espaces publics tout en réalisant un projet de densification.

Ce quartier a été choisi comme cas d'étude pour sa diversité en termes d'infrastructures et ses nombreux objectifs sociaux, environnementaux et culturels. Une étude a été effectuée sur les transports par le laboratoire LVMT de l'Ecole des Ponts. En ce qui concerne les bâtiments et l'énergie, le projet a été modélisé sur le logiciel Pléiades dans le but d'évaluer ses performances thermiques et environnementales des différents bâtiments du quartier.

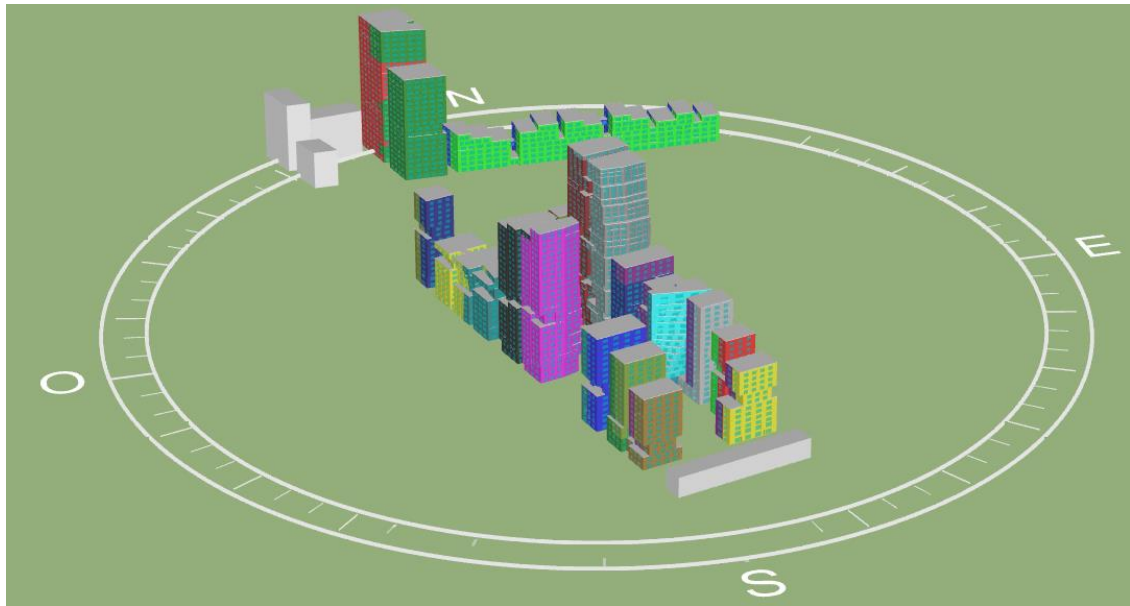


Figure 2-16 : Modélisation 3D du quartier des Lumières sur Pléiades

Le quartier des Lumières comprend de nombreux bâtiments, l'évaluation environnementale des 13 bâtiments de l'îlot principal sera présentée dans ce chapitre, et afin de faciliter la présentation des travaux de cette thèse, les développements pourront être appliqués en particulier sur deux bâtiments. Il s'agit d'un bâtiment de logements, nommé L1, et d'un bâtiment de bureaux, nommé R2. Leurs représentations 3D au sein du quartier sont présentées Figure 2-17, et leurs caractéristiques sont répertoriées dans le Tableau 2-6.

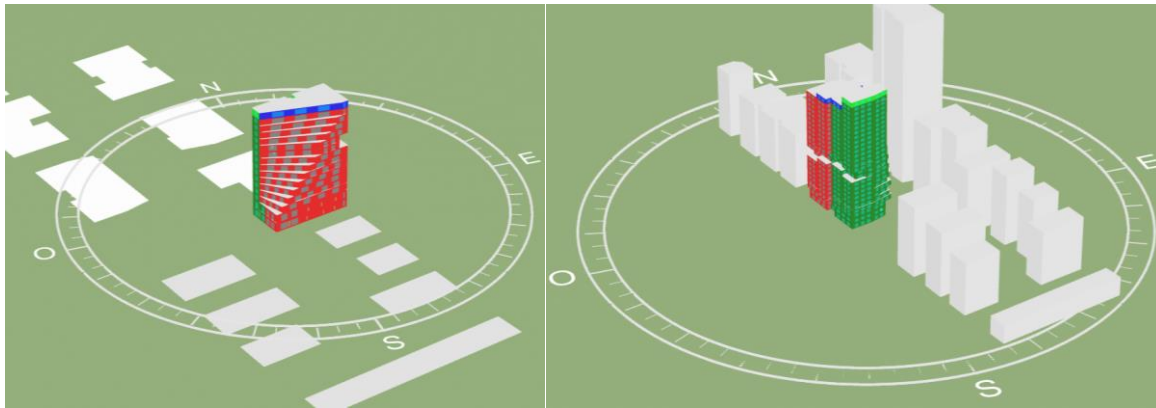


Figure 2-17 : Représentation 3D du bâtiment de logements (à gauche) et du bâtiment de bureaux (à droite)

Tableau 2-6 : Caractéristiques des bâtiments de bureaux de de logements

	R2	L1
Utilisation	Bureaux	Logements
Hauteur	98 m	47 m
Hauteur sous dalle RDC et R+1	3,8 m	3,8 m
Hauteur sous dalle à partir de R+2	3,2 m	2,8 m
Surface	33400 m ²	6977 m ²
Emprise au sol	1270 m ²	552 m ²
Nombre d'étages	26	15

La composition de l'enveloppe des bâtiments est supposée identique pour l'ensemble du quartier, elle est présentée en annexe B.

Le bâtiment de logements L1 est dimensionné pour héberger une personne pour 25 m² avec une occupation variable sur la journée, soit 279 personnes au total. La température de consigne de chauffage est considérée à 21°C de manière constante au cours de la journée, et le bâtiment n'est pas climatisé. La puissance dissipée par les appareils électroniques et électro-ménagers (télévision, ordinateurs, réfrigérateur, etc.) est estimée à 5 W/m². Une ventilation simple flux de 0.45 vol/h est prise en compte, et un scénario de surventilation est supposé égal à 3 vol/h la nuit afin de simuler l'ouverture de fenêtre en période estivale pour rafraîchir le bâtiment lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure. La surventilation nocturne s'arrête lorsque la température intérieure devient inférieure à 24°C.

Le bâtiment de bureaux R2 considère 12 m² par personne au cours de la journée en semaine. Les températures de consigne de la période d'occupation sont 21°C en chauffage et 26°C en rafraîchissement, tandis qu'en période d'inoccupation le bâtiment est considéré chauffé à 17°C, et non climatisé. Un scénario de puissance dissipée est mis en place afin de prendre en compte les apports

internes qui sont élevés compte tenu de l'usage uniquement de bureaux. Cela implique de faibles besoins de chauffage, sur une courte durée au cours de l'année. Une puissance dissipée de 16 W/m^2 est considérée en période d'occupation, et de 2 W/m^2 en période d'inoccupation du bâtiment. D'autre part, une ventilation double flux de $0,9 \text{ vol/h}$ en période d'occupation est installée dans le bâtiment, le rendement de l'échangeur s'élève à 80 %. Ce bâtiment ne comprend pas de surventilation nocturne estivale.

2.3.2 Optimisation du zonage thermique

Le nombre de zones thermiques et leur délimitation influencent l'évaluation thermique et environnementale d'un bâtiment mais aussi les temps de calcul. Or les problématiques de cette thèse imposent de réduire les temps de calcul dès que l'on en a la possibilité ; en effet, le passage de l'échelle du bâtiment à l'échelle de l'îlot ou du quartier, et la recherche d'un compromis entre les différentes variantes de conception à travers l'optimisation multicritère, présentent tous deux une contrainte de temps de calcul. Il est primordial d'effectuer une étude de zonage thermique en amont des évaluations et des optimisations afin de déterminer le zonage le plus adéquat, dans le but de minimiser le temps d'une simulation thermique tout en conservant la qualité des résultats. Différentes propositions de zonage thermique du cas d'étude ont été analysées ; une grande différence de précision et de temps de calcul entre les différentes variantes a alors été observée.

Une première approche s'est concentrée sur la modélisation de l'ensemble des bâtiments du quartier dans un fichier unique sur Pleiades comme le présente la Figure 2-16, avec une étape intermédiaire consistant à modéliser les bureaux d'une part et les logements d'autre part. La simulation du fichier regroupant les 5 bâtiments de bureaux montre que la précision des calculs augmente avec le nombre de zones, tandis que le temps de calcul de réduction des matrices diminue lorsque le nombre de zones augmente. En effet, la réduction est effectuée zone par zone. Dans un modèle à faible nombre de zones, les zones sont plus grandes et les matrices sont d'ordre plus élevé ce qui explique un temps de calcul plus long, malgré le fait qu'il y ait moins de matrices à traiter. Ce résultat est particulièrement observé dans le cas d'un nombre très restreint de zones thermiques (monozone jusqu'à 5 zones), pour lequel le temps de calcul est considérable ; les matrices sont alors trop conséquentes pour une réduction optimale. Le temps de calcul ne dépendant pas uniquement de la réduction des matrices, il existe un nombre de zones optimal au-delà duquel le temps de calcul de la simulation augmente, car le temps nécessaire aux calculs météorologiques et à la mise en température du bâtiment augmente avec l'augmentation du nombre de zones. Concernant la variante des bâtiments de bureaux, cet optimum correspond à 12 zones thermiques, un découpage qui permet d'assurer un faible temps de calcul et une précision sur les besoins de chauffage annuels totaux supérieure à 98 %, comme l'on peut le constater Figure 2-18. Ce zonage correspond en moyenne à deux zones par bâtiments, découpés par façade nord et sud.

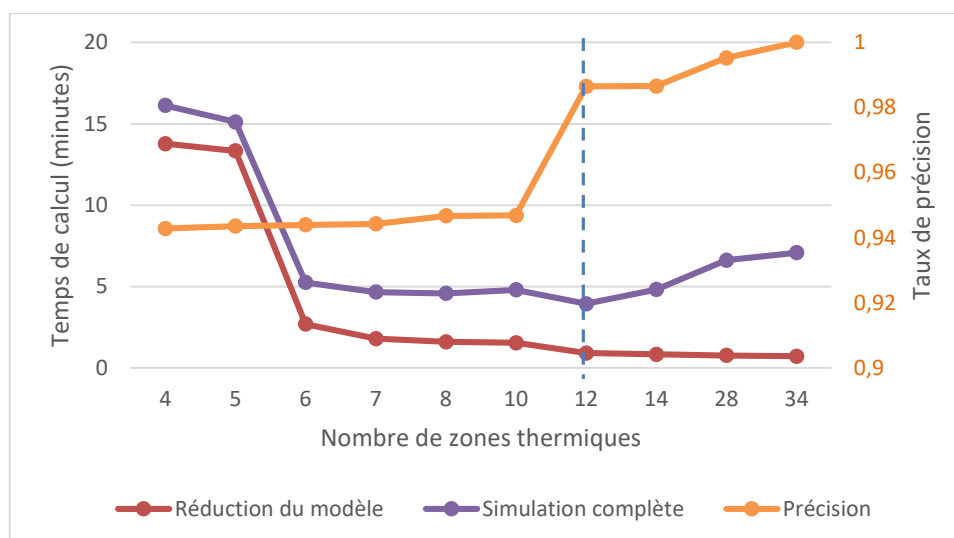


Figure 2-18 : Temps de calcul et taux de précision en fonction du nombre de zones thermiques

La même étude sur les bâtiments de logements a été effectuée, cependant ces derniers sont plus petits que les bureaux, la réduction des matrices est quasiment instantanée et le taux de précision est très élevé, le nombre de zones thermiques influence peu ces deux critères.

Les bâtiments de bureaux et de logement ont ensuite été rassemblés dans un même modèle avec le zonage défini, on constate alors une augmentation des temps de calcul. Tandis que les simulations des modèles de bureaux et de logements nécessitent respectivement environ 4 et 1 minutes, soit un total de 5 minutes, la simulation du modèle de l'ensemble des bâtiments du quartier prend 7 minutes. Cette différence de temps de simulation montre les limites de l'utilisation de Pleiades pour la modélisation d'un ensemble de bâtiments au sein d'un même fichier. En effet, cet outil est tout d'abord dédié à la simulation monobâtiment, et suite à des échanges avec le développeur d'Izuba, il a été décidé d'aborder une approche monobâtiment par la suite (un bâtiment par fichier) afin d'éviter différentes contraintes techniques. Il est tout de même utile d'ajouter qu'un outil quartier existe au sein du modèleur de Pleiades, permettant de créer au choix un modèle de l'ensemble des bâtiments ou un modèle par bâtiment en prenant en compte les masques solaires, mais cet outil comporte encore des limites concernant l'interprétation des résultats ACV et l'optimisation multicritère, nous avons choisi de ne pas l'utiliser dans cette thèse.

L'approche choisie consiste alors à modéliser les bâtiments du quartier un par un, les modèles pouvant aussi être générés par l'outil quartier. Les bâtiments de logements ayant de nombreuses caractéristiques similaires, nous choisirons un seul bâtiment pour l'étude du zonage thermique, et nous ferons de même pour les bâtiments de bureaux. Le bâtiment de logements étudié est le bâtiment L1 présenté au paragraphe 2.3.1, et le bâtiment de bureau a également été présenté dans ce paragraphe, il s'agit du bâtiment nommé R2.

Une dizaine de configurations de zonage thermique du bâtiment de logements collectifs L1 ont été testées afin de valider l'intérêt d'effectuer les simulations en multizone et de définir le nombre et la composition du zonage optimal. Le temps de la simulation et les besoins de chauffage associés sont répertoriés dans un premier temps pour chaque simulation ; la configuration comprenant 12 zones thermiques est considérée comme référence pour calculer le taux de précision des besoins de chauffage. La représentation 3D de la référence détaillant la configuration des zones thermiques est illustrée Figure 2-19. La relation entre le temps de simulation et la précision des différentes configurations de zonage thermique étudiées est illustrée Figure 2-20.

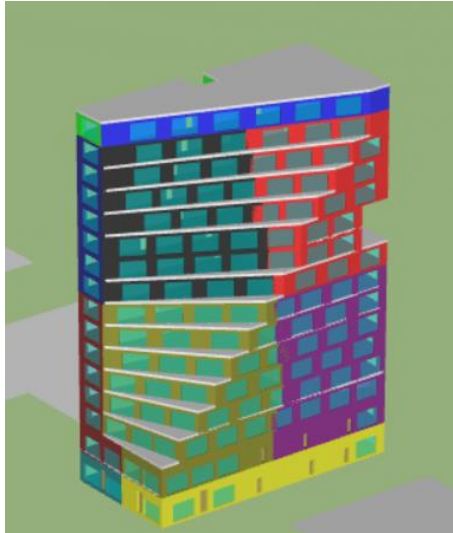


Figure 2-19 : Représentation 3D de la variante de référence comprenant 12 zones thermiques avec zonage apparent

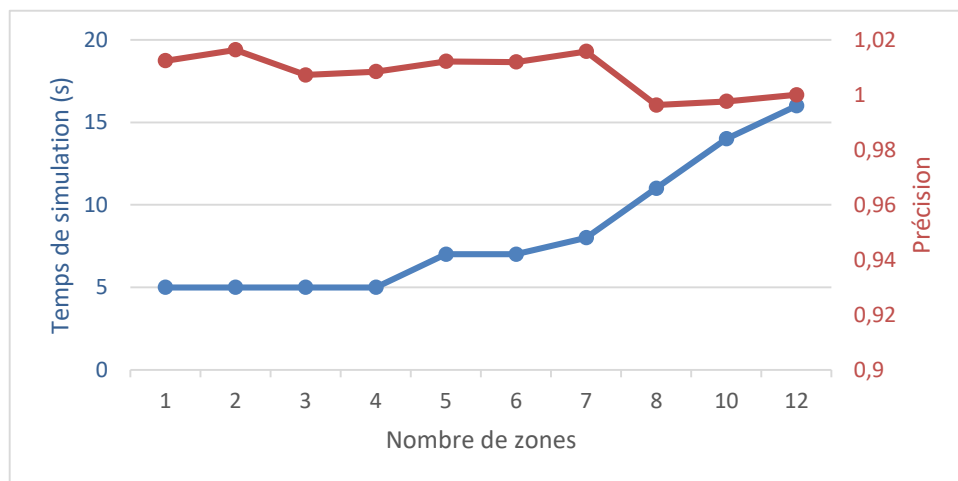


Figure 2-20 : Temps de simulation et précision des résultats thermiques du bâtiment L1 en fonction du nombre de zones thermiques

Le bâtiment ne comprend pas de système de climatisation, il est alors important de vérifier également le niveau de confort. Un taux d'inconfort basé sur le nombre d'heures durant lesquelles la température dépasse 27°C est implémenté ; il correspond à la moyenne de l'inconfort des différentes zones pondérée par les surfaces. La précision du niveau de confort des différentes configurations de zonage thermique est calculée avec le taux d'inconfort de la variante comprenant 12 zones comme référence, elle est illustrée Figure 2-21.

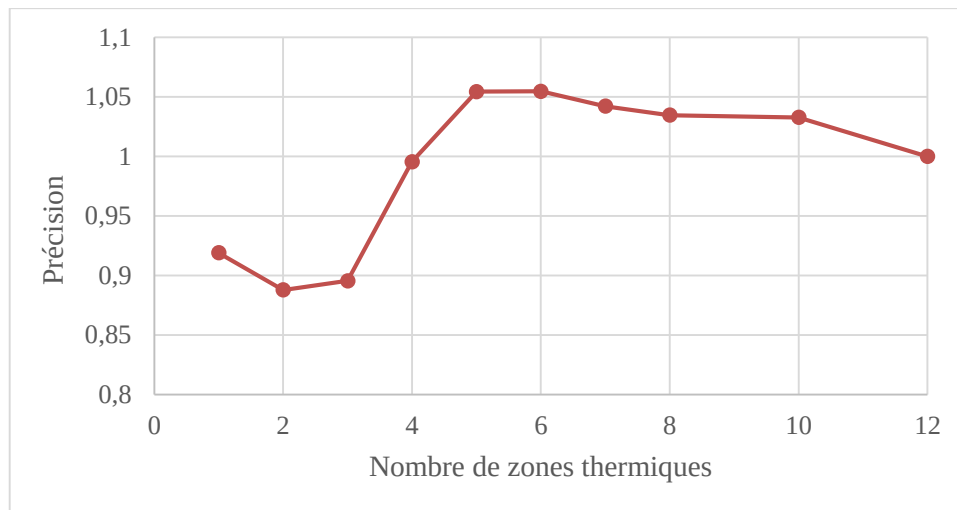


Figure 2-21 : Précision du niveau d'inconfort en fonction du nombre de zones thermiques

Le bâtiment de logements L1 présente un écart négligeable sur la variation des besoins de chauffage (moins de 0,2 %), nous proposons alors de concentrer la décision concernant le zonage thermique sur le temps de simulation et le niveau de fiabilité du calcul du confort thermique. Le taux d'inconfort présente une erreur d'environ 10 % pour les configurations dont le nombre de zones est inférieur à 4, ce qui est relativement élevé ; tandis que la précision du calcul lorsque le nombre de zones est supérieur ou égal à 4 est supérieure à 95 %. Le temps de simulation est constant pour un nombre de zones variant de 1 à 4, puis augmente à partir de cinq zones ; le choix se portera alors sur quatre zones thermiques, réparties de la manière suivante :

- Nord
- Sud
- Nord dernier étage
- Sud dernier étage.

La représentation 3D du bâtiment L1 Figure 2-17 différencie ces quatre zones thermiques par des couleurs différentes.

La même étude a été réalisée sur le bâtiment de bureaux. Ce dernier est près de cinq fois plus grand que le bâtiment de logements, le zonage est beaucoup plus influent. On observe la même problématique que pour l'ensemble des bâtiments du quartier, présentés précédemment, une configuration monozone nécessite un très long temps de calcul, le modèle comporte alors des matrices trop complexes pour une réduction rapide. Cette configuration est donc évincée, d'autant plus qu'elle ne permet pas d'approcher les résultats thermiques recherchés, elle est trop imprécise. La disposition des zones thermiques est un facteur très influent sur la qualité de la simulation ; un découpage en 10 zones thermiques séparant en priorité les étages, ainsi que certaines orientations (nord et sud pour certains étages par exemple) n'est pas suffisante pour approcher de bons résultats thermiques, en particulier concernant les besoins de rafraîchissement. Il est nécessaire d'opter pour une séparation des zones par « blocs » plutôt que par

étage pour obtenir des résultats précis (moins de 1% d'écart à la référence pour les besoins chauds et 5 % pour les besoins froids), pour un temps de calcul de 36 secondes. La variante retenue comprend huit zones thermiques dont la répartition est présentée dans le Tableau 2-7, et illustrée par les différentes couleurs de zones thermiques apparentes Figure 2-22.

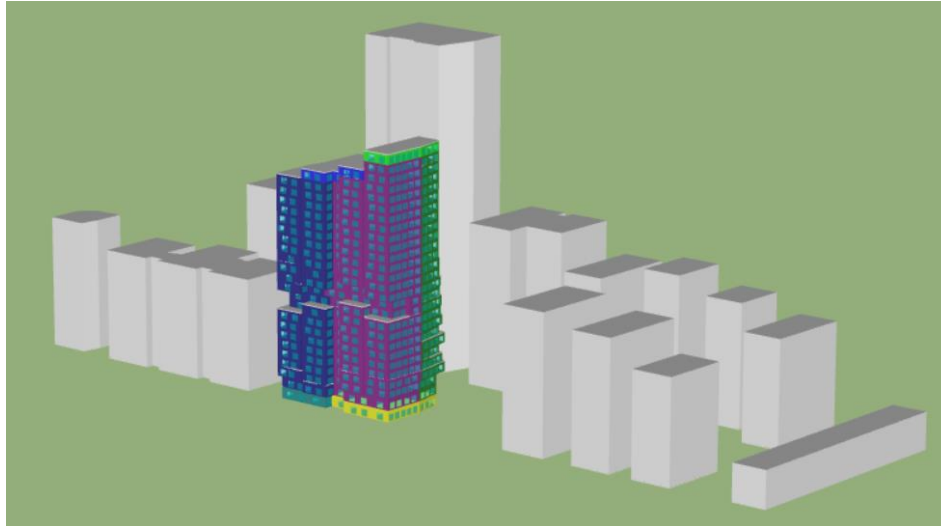


Figure 2-22 : Représentation 3D du bâtiment de bureaux - Zonage optimal

Tableau 2-7 : Répartition des 8 zones du bâtiment de bureaux

	Sud	Nord	Est	Ouest
RDC	X	X		
Etages courants	X	X	X	X
Dernier étage	X	X		

2.3.3 Démarche d'ACV appliquée au cas d'étude

2.3.3.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude

Le quartier des Lumières fait partie d'un projet de grande envergure d'aménagement des alentours de la gare de Saint-Denis, plus grande gare du Grand Paris Express, projet de réseau de transport public, composé de quatre lignes de métro automatiques autour de Paris et de l'extension de deux lignes existantes. L'aménagement de ce quartier présente un grand degré de liberté, c'est donc une opportunité pour construire de manière responsable en optimisant les différents bâtiments pour réduire les impacts environnementaux. L'évaluation environnementale est effectuée par la méthode de l'analyse de cycle de vie, afin de considérer les impacts sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments, traduits sous forme d'indicateurs environnementaux comme expliqué au paragraphe 1.2.4.1 de cette thèse. Le jeu d'indicateurs comprend des indicateurs orientés dommages, un indicateur de niveau midpoint et des indicateurs de flux. Les méthodes de caractérisation sont présentées au paragraphe 2.1.4.1, et le jeu d'indicateurs considéré pour cette étude de cas est indiqué ci-après :

- Changement climatiques (kg CO₂eq.)
- Consommation d'énergie primaire (MJ)
- Consommation d'eau (m³)
- Déchets produits (kg)
- Déchets radioactifs (kg)
- Dommages à la biodiversité (PDF.m².an)
- Dommages à la santé humaine (DALY)

L'objectif de l'ACV est d'estimer les impacts environnementaux induits par les bâtiments du quartier et de prendre connaissance des éléments les plus influents sur les différents indicateurs afin d'orienter les parties prenantes vers des décisions à moindre impact sur l'environnement. Dans un second temps, cette évaluation environnementale permettra de comparer différentes variantes de conception en procédant à une méthode d'optimisation multicritère pour trouver le meilleur compromis entre les différents critères environnementaux et économiques. Cette seconde approche fera l'objet du troisième chapitre.

L'unité fonctionnelle dépend du périmètre pris en compte dans ce cas d'étude, variant de l'échelle d'un bâtiment à la totalité du quartier. Cependant, la fonction du quartier est d'héberger les habitants et les travailleurs dans des bâtiments adéquats, avec un niveau de confort défini, en considérant les consommations de chauffage, d'eau (en particulier eau chaude sanitaire), de ventilation et d'électricité spécifique. La durée de vie des bâtiments considérée est de 100 ans, et les résultats environnementaux seront ramenés à une année et à 1 m² afin de créer une référence unique permettant la comparaison de variantes environnementales.

L'ensemble des impacts relatifs à l'utilisation des bâtiments sont pris en compte, depuis l'extraction des matières premières pour la fabrication des matériaux de construction jusqu'à la fin de vie des éléments, sans oublier l'étape d'utilisation des bâtiments qui est la plus longue du cycle de vie (100 ans). Bien que le quartier fasse l'objet de cette évaluation environnementale, l'étude a pour but de minimiser les impacts des bâtiments, ainsi seul le bâti est pris en compte dans une première ACV du quartier. Les transports des occupants et la gestion des déchets ménagers sont alors considérés en dehors des frontières du système. Ils pourront faire l'objet d'une analyse de sensibilité par la suite. Les impacts relatifs à la gestion de l'énergie et de l'eau sont pris en compte. Le traitement de potabilisation de l'eau et son assainissement sont intégrés à l'impact de l'utilisation d'eau par les occupants du quartier, et les impacts associés aux consommations énergétiques dépendent des systèmes mis en place à l'échelle du quartier, ils seront présentés au paragraphe 3.4. Le système considéré est alors plus large que les bâtiments étudiés : il inclut la production d'électricité et de chaleur, la production d'eau potable et le traitement des eaux usées, la fabrication des produits de construction et les procédés de fin de vie.

Chapitre 2. L'ACV à l'échelle d'un projet urbain

Une fois la définition et le cadre de l'étude réalisés, de nombreux choix méthodologiques doivent être faits pour l'évaluation environnementale. Tout d'abord, comme précisé au paragraphe 2.1.6.2 cette ACV sera réalisée dans une approche attributionnelle sur la base d'un modèle dynamique horaire. En ce qui concerne le choix de l'horizon temporel, les données de l'inventaire de cycle de vie proviennent de la base de données ecoinvent 3.4, sur un horizon glissant de 100 ans, selon la méthode issue du GIEC. Les données environnementales utilisées pour les produits de construction et les procédés sont contextualisées lorsque le produit est fabriqué localement (par exemple le béton), le mix électrique de la base de données ecoinvent est alors remplacé par le mix français. Les données environnementales fournissent pour chaque unité fonctionnelle (kg de matériau, m³ d'eau potable, kWh de chaleur produite etc.) environ 4000 flux élémentaires correspondant aux émissions dans l'air, l'eau et le sol, aux déchets ainsi qu'aux matières premières et aux combustibles puisés dans l'environnement.

2.3.3.2 Hypothèses pour l'ACV

Des hypothèses concernant la construction du bâtiment, la gestion de son occupation et des déchets sont également nécessaires à la réalisation d'une ACV. Ces hypothèses sont explicitées dans les points suivants :

❖ Durée de vie

Tandis que la durée de vie du bâtiment considérée est de 100 ans, les portes et les fenêtres sont renouvelées tous les 30 ans, les revêtements tous les 10 ans, et les équipements tous les 20 ans. Les autres matériaux, sauf exception, sont considérés ayant la même durée de vie que le bâtiment, soit 100 ans.

❖ Occupation du bâtiment

La consommation d'eau chaude sanitaire des occupants des logements est estimée à 40 litres par personne et par jour, et la consommation d'eau froide à 100 litres par personne et par jour. Le rendement du réseau d'eau est de 80 %. L'eau chaude sanitaire est produite à partir du réseau de chaleur assurant également le chauffage. Les caractéristiques de ce dernier seront présentées dans le paragraphe 3.4.

Le mix électrique sélectionné pour la réalisation de cette première ACV est un mix moyen annuel, qui représente la répartition entre les différentes technologies de production d'électricité au cours de l'année 2016. Cette moyenne sollicite au cours de l'année 76 % d'électricité provenant des centrales nucléaires, 19 % d'énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, etc.) et 5 % d'énergies thermiques, elle est calculée à partir du mix dynamique attributionnel provenant du modèle élaboré dans la thèse de (Roux, 2016) qui sera implémenté à partir du chapitre 3 de cette thèse. Le réseau électrique comprend des pertes, qui sont estimées à 9 % dans cette ACV.

❖ Gestion des déchets en fin de vie

La détermination des procédés de traitement en fin de vie influence l'impact environnemental des matériaux ; le béton, le cuivre et l'acier sont recyclés en vue, pour le béton, d'être réutilisé sous forme de gravier concassé, tandis que le recyclage du cuivre et de l'acier évite l'impact de la fabrication prochaine de ces matériaux. Les portes sont en bois et les encadrements de fenêtres le sont également, ces éléments sont incinérés en fin de vie. Les panneaux de bois, le polystyrène, le polyuréthane et le PVC sont également incinérés. Les autres matériaux, tels que la laine de verre, le plâtre ou le carrelage sont placés en décharge.

La distance entre les usines de production des matériaux et le chantier est de 100 km, la distance entre le site et la décharge destinée aux matériaux inertes en fin de vie est de 20 km, l'incinérateur est situé à 50 km et les centres de recyclage à 100 km du site.

❖ Données de construction

Le chantier de construction du bâtiment implique des pertes estimées à 5 % de surplus des matériaux. Les matériaux structurels sont pris en compte dans l'ACV, leur quantité est basée sur le modèle de pré-dimensionnement des structures, présenté au paragraphe 2.1.5. Le béton et l'acier utilisés dans les fondations ne sont pas intégrés à la simulation thermique, les quantités de matériaux sont uniquement ajoutées lors de l'ACV du bâtiment. Il en est de même pour d'autres éléments du bâtiment n'intervenant pas dans les besoins thermiques, comme les équipements sanitaires, les réseaux d'eau potable et d'eaux usées et les équipements électriques. Les matériaux nécessaires sont alors ajoutés sous forme d'un forfait, dont les données sont fournies en Annexe C.

2.3.4 Spécificités du quartier

Un des principaux leviers d'action de l'ACV à l'échelle des projets urbains repose sur la possibilité d'intégrer un système de chauffage centralisé. L'aménageur du quartier des Lumières a indiqué qu'un réseau de chaleur serait installé par un groupe industriel énergétique français, prévoyant son alimentation à 54 % par une chaudière bois, et à 46 % par une chaudière gaz. L'ACV du réseau de chaleur est intégrée à l'évaluation environnementale de l'étape d'utilisation des bâtiments. L'impact de la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire par le réseau de chaleur est calculé à partir de deux fiches environnementales provenant de la base de données ecoinvent 3.4, présentées ci-dessous :

- Une production de chaleur alimentée par des copeaux de bois dur, avec un four de 1000 kW. Il s'agit de la combustion de plaquettes de bois naturel provenant d'une forêt en Suisse dans des chaudières neuves installées en 2014 équipées d'un électrofiltre afin de respecter la réglementation sur les émissions de particules. Le jeu de données comprend les impacts de l'infrastructure, les besoins en bois, les émissions dans l'air, l'électricité nécessaire au

fonctionnement et l'élimination des cendres. Les facteurs d'émission dans l'air ainsi que l'efficacité de la chaudière représentent le fonctionnement annuel moyen de l'installation, y compris le démarrage et l'arrêt. Les données d'émissions sont donc plus élevées que les valeurs nominales fournies par les fabricants, de même que le rendement considéré est inférieur aux données des fabricants. Cet inventaire est initialement destiné aux productions de puissance supérieure à 1000 kW mais est également représentatif pour les chaudières donc la capacité nominale est supérieure à 500 kW, d'après la base de données. Le jeu de données a été créé pour un contexte suisse puis a été adapté au contexte français, il est disponible sur ecoinvent sous le nom « heat production, hardwood chips from forest, at furnace 1000kW, state-of-the-art 2014, CH »

- Une chaudière modulante de puissance supérieure à 100 kW, alimentée par du gaz naturel. Ce jeu de données initialement créé pour un contexte européen (excluant la suisse) a été adapté au contexte français. Son nom ecoinvent est le suivant : “heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW, Europe without Switzerland”

Tandis que l'énergie est gérée à l'échelle du quartier par l'implémentation d'un réseau de chaleur et le raccordement de l'ensemble du quartier à ce dernier, la gestion de l'eau est supposée correspondre à une moyenne nationale, de manière identique à la gestion de l'eau à l'échelle d'un bâtiment. De plus, les déchets ménagers et les impacts relatifs au transport des occupants ne sont pas considérés dans cette étude étant donné qu'il s'agit de comparer des variantes de conception, équivalentes sur ces aspects, et non d'une comparaison concernant par exemple l'emplacement du projet qui pourrait les influencer.

2.3.5 Résultats de simulation énergétique

Les résultats issus de la simulation thermique dynamique des bâtiments de logements montrent l'influence de l'emplacement des bâtiments au sein du quartier compte tenu des masques solaires que cela génère, ainsi que de la forme des bâtiments. En effet, la surface des différents niveaux des logements n'est pas forcément homogène au sein d'un bâtiment. La surface déperditive est donc différente en fonction des bâtiments, cela se traduit sur les résultats thermiques des bâtiments qui présentent des variations entre les différents logements numérotés de 1 à 8, présentés Figure 2-23. Les bâtiments de logements n'ont pas de climatisation, le rafraîchissement est assuré dans la simulation par l'ouverture des fenêtres la nuit en été lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure créant ainsi un rafraîchissement gratuit, également appelé *free cooling*. La construction d'un bâtiment sans climatisation nécessite au préalable de s'assurer du confort thermique des occupants à travers la modélisation. Le nombre d'heures durant lesquelles la température du bâtiment est supérieure à 27 °C est comptabilisé, à partir duquel le taux d'inconfort est calculé. Ce dernier correspond à la moyenne sur les différentes zones d'un bâtiment, pondérée par la surface des zones. Il est représenté en pourcentage

Figure 2-23, on observe alors qu'il est inférieur à 4 % pour l'ensemble des bâtiments de logements, ce qui peut être considéré comme acceptable. Cependant, ces hypothèses nécessitent une sensibilisation auprès des occupants concernant leur comportement, car les résultats provenant de la modélisation dépendent de leur assiduité à gérer les protections solaires et l'ouverture des fenêtres.

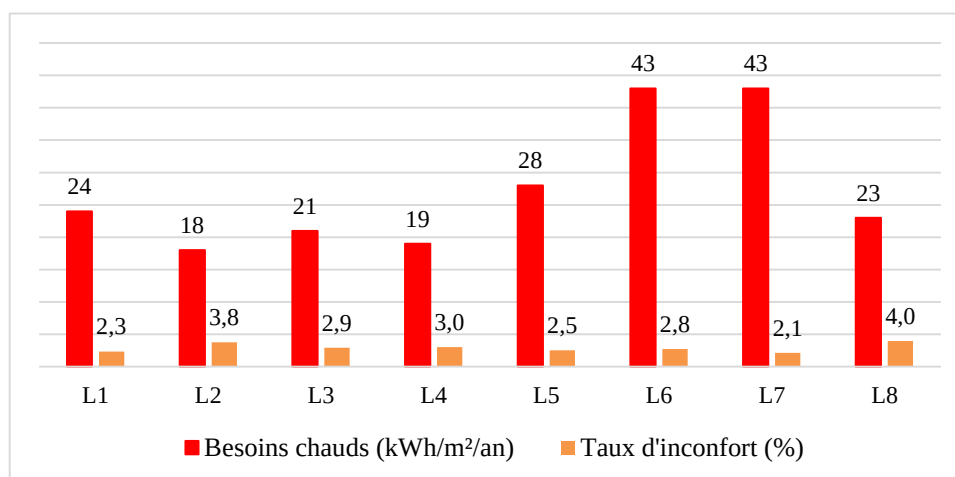


Figure 2-23 : Résultats issus de la simulation thermique des bâtiments de logements collectifs

La simulation thermique des bâtiments de bureaux met en avant un aspect propre à l'usage du bâtiment ; l'utilisation des bureaux implique une consommation importante d'électricité spécifique provenant en majorité de l'utilisation des ordinateurs. Cette consommation crée alors un apport interne conséquent, permettant de réduire considérablement les besoins de chauffage, dont la moyenne s'élève à 2,1 kWh/m²/an. En été, les apports internes réchauffent également les bâtiments et augmentent les besoins de climatisation, dont la moyenne annuelle s'élève à 16,3 kWh/m². De plus, le scénario appliqué aux logements supposant que les habitants ouvrent les fenêtres dès lors qu'il y a une possibilité de rafraîchissement gratuit n'est pas applicable aux bureaux, car ces derniers ont souvent une grande hauteur (c'est le cas des bâtiments R2 et R3 dans ce cas d'étude). L'usage est également une contrainte ; les travailleurs n'occupent pas le bâtiment la nuit, généralement le moment de la journée au cours duquel la température extérieure est inférieure à la température intérieure. Enfin, les masques solaires et la forme des bâtiments influencent également les résultats thermiques ; dans le cas des bureaux les masques solaires sont généralement préconisés afin de réduire les besoins froids, tandis que la surface déperditive est à réduire au maximum pour diminuer les besoins de chauffage en hiver et les besoins de climatisation en été. La température au sein des bureaux est constamment régulée car les systèmes de chauffage et de climatisation sont disponibles toute l'année, ainsi la température intérieure oscille entre 21°C et 26°C qui sont les températures de consignes respectives en chauffage et en climatisation, et le taux d'inconfort est de 0 %. La Figure 2-24 présente les besoins chauds et froids par bâtiment de bureaux au cours de l'année.

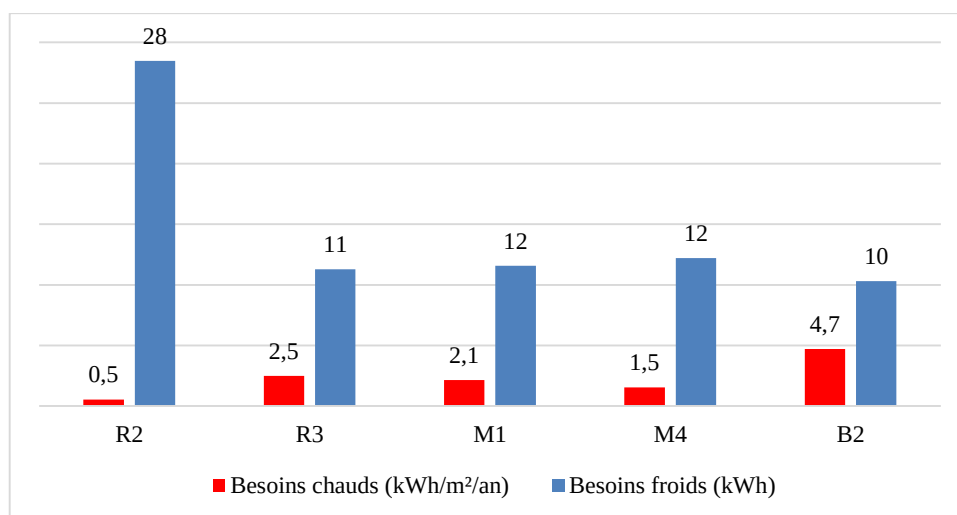


Figure 2-24 : Résultats issus de la simulation thermique des bâtiments de bureaux

2.3.6 Résultats ACV du cas d'étude

L'évaluation environnementale de l'ensemble des bâtiments du quartier a été effectuée à partir des objectifs et des hypothèses présentés au paragraphe 2.3.3. Tous les bâtiments ont été modélisés et simulés séparément, avec des hypothèses environnementales communes. La simulation thermique ayant montré une distinction de comportement entre les différents usages de bâtiments, l'évaluation environnementale de l'ensemble des bâtiments de logements collectifs sera présentée dans un premier temps, suivie par l'évaluation des bâtiments de bureaux. Ensuite, le détail des contributions sera observé sur un bâtiment de logements et un bâtiment de bureaux à titre d'exemple, afin de mieux comprendre la contribution des matériaux et de l'usage sur l'impact environnemental.

Bâtiments de logements

Les besoins de chauffage diffèrent selon les bâtiments, cela impacte l'évaluation environnementale car l'étape d'utilisation d'un bâtiment est très longue par rapport aux étapes de construction et de fin de vie. Les impacts environnementaux des huit bâtiments de logements sont résumés sur un graphique radar, Figure 2-25. Notons toutefois que le jeu d'indicateurs contient des indicateurs orientés dommages, un indicateur environnemental intermédiaire de niveau midpoint, et des indicateurs de flux. Les différentes catégories d'indicateurs ne doivent pas être confondues, ni additionnées, car cela impliquerait un double comptage. Par exemple, les impacts sur le changement climatique contribuent aux dommages à la santé humaine et à la biodiversité, l'impact du changement climatique est donc présenté plusieurs fois sur la Figure 2-25. La rigueur scientifique nécessiterait de séparer les résultats environnementaux par catégorie d'indicateurs. Cependant, ce graphique a pour but l'aide à la décision, il permet une visualisation rapide de l'ensemble des indicateurs, et étant donné que certains indicateurs tels que les niveaux endpoint ne sont pas encore maîtrisés par tous les acteurs du secteur du bâtiment, il

nous semble nécessaire de présenter les résultats bruts de l'indicateur du changement climatique et des différents indicateurs de flux, en plus des indicateurs orientés dommages.

La variation des impacts environnementaux entre les différents bâtiments de logements est présentée Figure 2-25 à partir d'une référence ; il s'agit du bâtiment L6, affichant les plus grands besoins chauds. La production de chauffage et d'eau chaude sanitaire est assurée par le réseau de chaleur, constitué à 54 % de chauffage bois et à 46 % de chauffage gaz.

Tout d'abord, on remarque que les quantités d'eau utilisée et de déchets radioactifs sont identiques pour tous les bâtiments ; en effet, la principale source de consommation d'eau est l'utilisation des habitants, or un scénario de consommation d'eau est défini par habitant et ne fluctue pas entre les bâtiments d'un même usage. D'autre part, les déchets radioactifs proviennent de la production d'électricité nucléaire, qui est la technologie majoritaire dans le mix implémenté, cependant seul le poste d'électricité spécifique est alimenté par ce mix, car le chauffage et l'ECS sont assurés par le réseau de chaleur, lui-même alimenté en bois et en gaz. De même, un scénario de puissance dissipée est établi en fonction de l'usage du bâtiment, ainsi les déchets radioactifs ne varient pas non plus entre les bâtiments de même usage. Enfin, la consommation d'énergie primaire, le changement climatique, les dommages à la santé humaine et les dommages à la biodiversité varient d'un bâtiment à l'autre, suivant la variation des besoins de chauffage. Les résultats présentés mettent en évidence la part importante de l'étape d'utilisation sur les impacts environnementaux, nous détaillerons par la suite les impacts engendrés par les différentes étapes du cycle de vie.

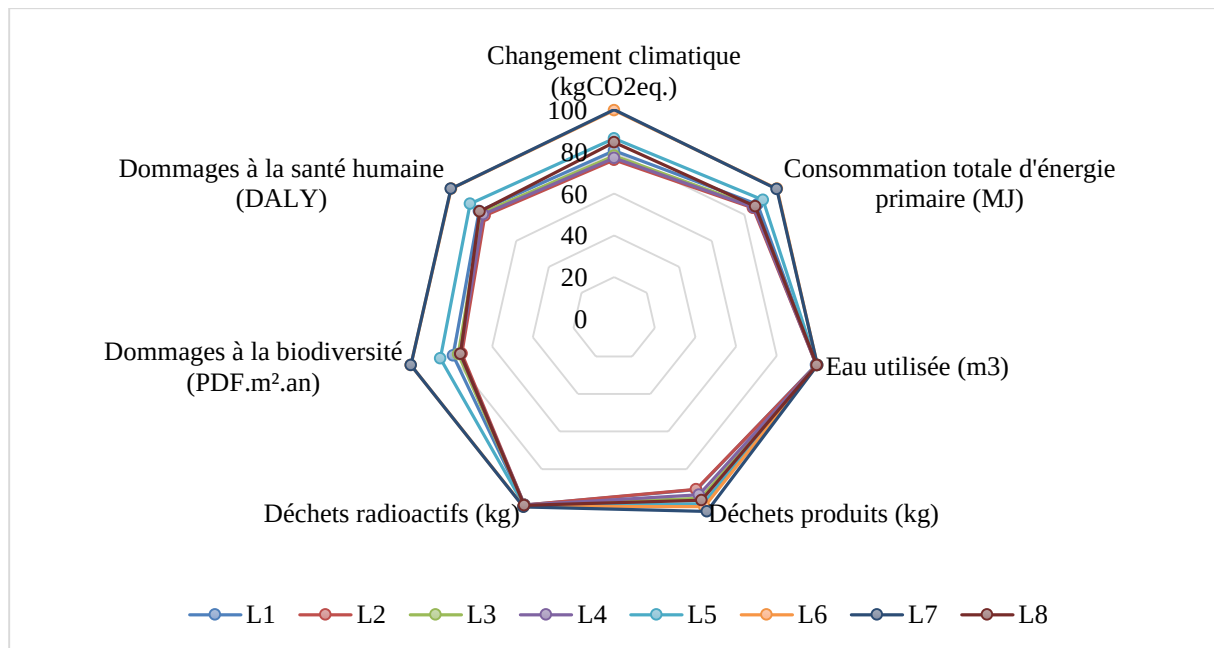


Figure 2-25 : Impacts environnementaux des bâtiments de logements

Les variations observées entre les différents bâtiments concernant l'indicateur des dommages à la santé humaine proviennent majoritairement de l'utilisation du gaz dans le RCU, tandis que les dommages à la biodiversité sont accentués par l'utilisation du bois. En effet, l'utilisation de bois nécessite une surface de forêts, comptabilisée dans l'indicateur de niveau *midpoint* d'occupation des sols contribuant aux dommages à la biodiversité. Les impacts sur la biodiversité et sur la santé humaine provenant de la production d'un TJ d'énergie par le réseau de chaleur sont présentés Figure 2-26, détaillant la contribution des deux technologies sur chaque indicateur orienté dommage. L'impact sur le changement climatique associé à l'utilisation du réseau de chaleur provient à 95 % de la chaudière gaz.

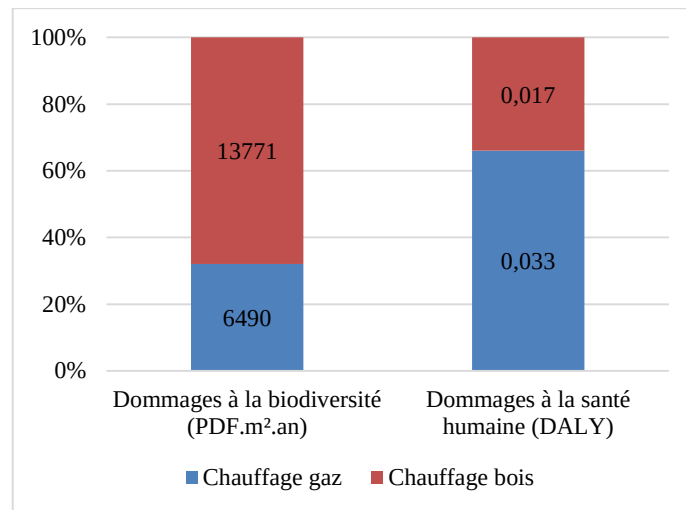


Figure 2-26 : Provenance des impacts lors de la production d'un TJ de chaleur par le RCU

Bâtiments de bureaux

Les impacts engendrés par les bâtiments de bureaux ne proviennent plus majoritairement de l'utilisation du réseau de chaleur étant donné que les besoins chauds sont très faibles, ni de la consommation d'eau des occupants, également bien plus faible que dans les logements. La climatisation est alimentée par le mix électrique présenté précédemment, une part importante de production d'énergie nucléaire est donc nécessaire à l'utilisation des bureaux. Or le fonctionnement des centrales nucléaires nécessite un refroidissement impliquant une consommation d'eau. Ainsi, l'eau utilisée dans un bâtiment de bureau dépend en grande partie des besoins de climatisation associés. Les déchets radioactifs dépendent également de l'utilisation des centrales nucléaires et donc de la demande de climatisation. Ils sont également augmentés par la demande d'électricité spécifique qui est importante dans les bureaux, mais constante au cours de l'année. Enfin, l'utilisation du réseau de chaleur engendre tout de même des impacts visibles sur les dommages à la biodiversité du bâtiment B2, qui présente des besoins de chauffage plus importants que les autres bâtiments. Bien que ces derniers soient très faibles, la différence se fait ressentir sur l'indicateur de préservation de la biodiversité, à travers l'occupation des sols engendrée par l'approvisionnement en bois du RCU.

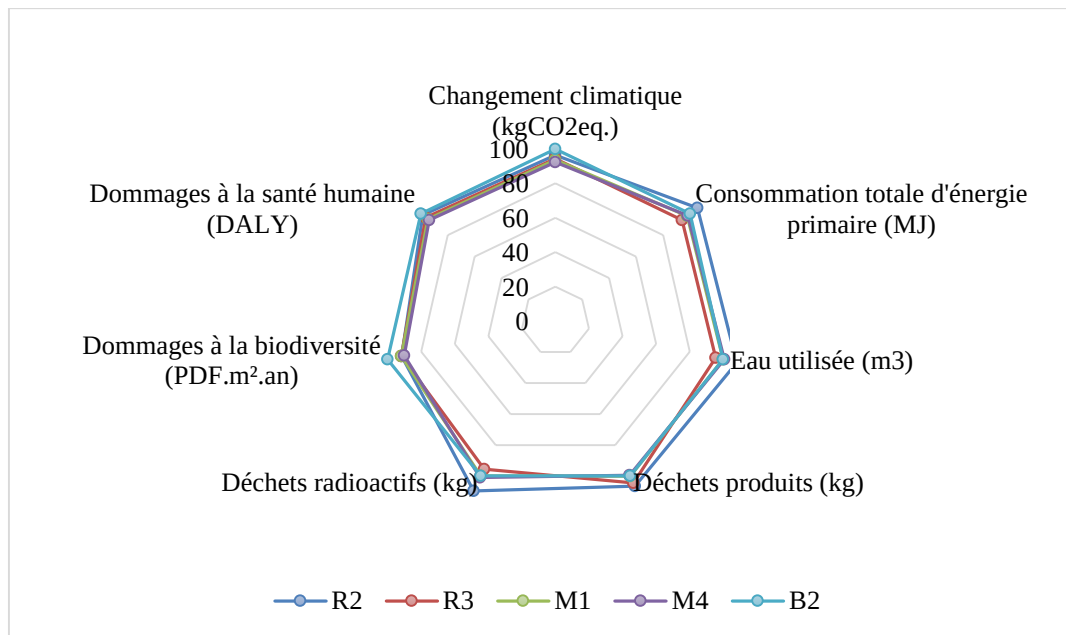


Figure 2-27 : Impacts environnementaux des bâtiments de bureaux

Analyse de contribution d'un bâtiment de logements

Le bâtiment de logements collectifs L1 a été sélectionné afin d'effectuer une analyse de contribution en vue de mieux comprendre l'origine des impacts engendrés par les bâtiments de logements du quartier des Lumières, cas d'étude de cette thèse. La contribution des quatre étapes du cycle de vie au sein de chaque indicateur est illustrée Figure 2-28.

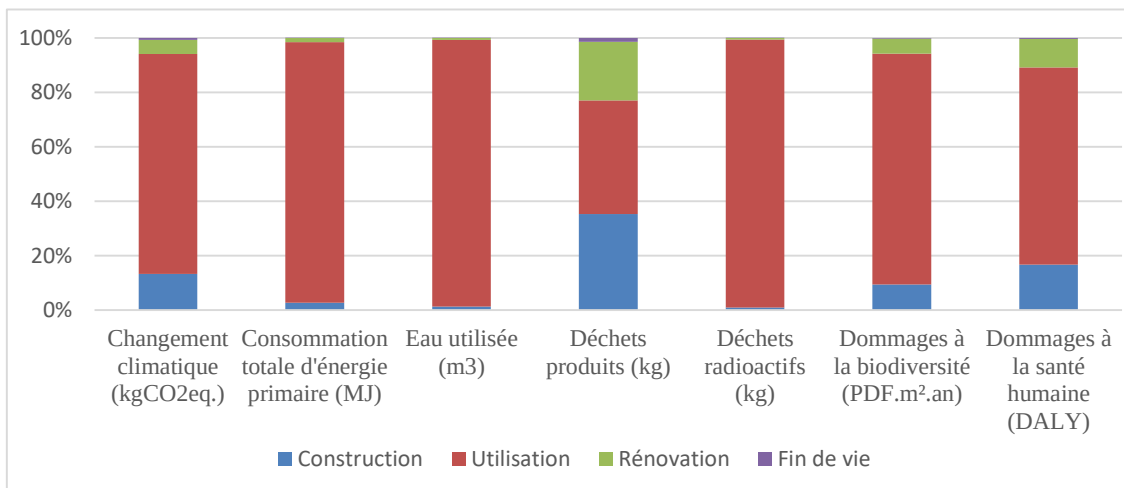


Figure 2-28 : Contribution des étapes du cycle de vie aux impacts environnementaux du bâtiment L1

On constate que l'étape d'utilisation est majoritaire pour l'ensemble des indicateurs, seuls les déchets produits présentent une petite particularité, car les étapes de construction, de rénovation et de fin de vie sont plus importantes que pour les autres indicateurs. Les impacts des différents postes relatifs à l'utilisation du bâtiment sont alors détaillés dans la Figure 2-29. Comme indiqué dans l'analyse

précédente les déchets radioactifs proviennent quasiment intégralement de la production d'électricité spécifique, qui augmente également la consommation d'eau lors de la sollicitation des centrales nucléaires. Les impacts sur le changement climatique proviennent principalement de la production de chauffage et d'ECS du réseau de chaleur, alimentée presque pour moitié en gaz. La production d'électricité spécifique contribue également à cet indicateur de par le mix électrique ; bien qu'une petite partie du mix fasse appel à des technologies thermiques, leur impact sur le changement climatique est tel que la contribution de ce poste est non négligeable.

Les déchets produits par le cycle de vie du bâtiment proviennent à 37 % de l'étape d'utilisation, et l'analyse de contribution de cette étape montre que près de 50 % des déchets proviennent de l'utilisation de l'eau (traitement des eaux usées), sachant que les déchets ménagers ne sont pas pris en compte. Ce poste est donc responsable de 18 % des déchets produits sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment L1. D'une part, cette part provient du fait que la majorité des matériaux sont recyclés ou incinérés en fin de vie, ce qui limite considérablement les déchets issus de la construction. D'autre part, l'assainissement des eaux usées génère différents types de déchets. Des matières de curage s'accumulent dans les réseaux d'assainissement, il s'agit par exemple de graviers, de sables, de matières organiques et de graisses issues de l'artisanat et de la restauration. Les stations d'épurations urbaines génèrent des déchets solides issus de la nature (bouts de bois, feuilles) et de l'activité humaine (boîtes de conserve, bouteilles en plastique), des matières de dessablage comme le sable ou le gravier, des matières grasses et des boues².

Enfin, la demande d'électricité spécifique est relativement élevée, le scénario de puissance dissipée a été fixé à 5W/m² tout au long de la journée. Cela équivaut pour le bâtiment L1 à une consommation annuelle de 44 kWh/m² d'électricité produite à partir du mix électrique. L'énergie ainsi consommée est de l'énergie finale qui a subi de nombreux changements et transformations depuis son état naturel, notamment un certain nombre de pertes. L'indicateur permettant de mesurer l'impact environnemental est la consommation d'énergie primaire associée, exprimé en MJ. Il prend en compte l'énergie perdue lors de la transformation de l'énergie primaire en chaleur (combustion ou réaction nucléaire) puis en travail pour faire tourner un alternateur. Le rendement des technologies de production d'énergie considéré à travers un coefficient fixé à 2,3 par la réglementation française n'est pas considéré dans cette étude. Il est calculé en fonction du mix de production, des valeurs spécifiques à chaque technologie étant considérées dans la base ecoinvent. L'énergie primaire nécessaire pour répondre à la demande d'électricité spécifique est d'autant plus élevée qu'il s'agit d'électricité provenant en grande partie des centrales nucléaires qui ont un rendement relativement faible (d'où un coefficient élevé de l'ordre de 3,9 pour le nucléaire, 3.6 pour le mix moyen de 2016 considéré), ce qui explique la part importante de l'électricité spécifique sur la consommation totale d'énergie primaire présentée Figure 2-29.

²<https://expertises.ademe.fr/professionnels/collectivites/patrimoine-communes-comment-passer-a-laction/dechets-services-publics/dechets-issus-lassainissement> - accès en juillet 2022

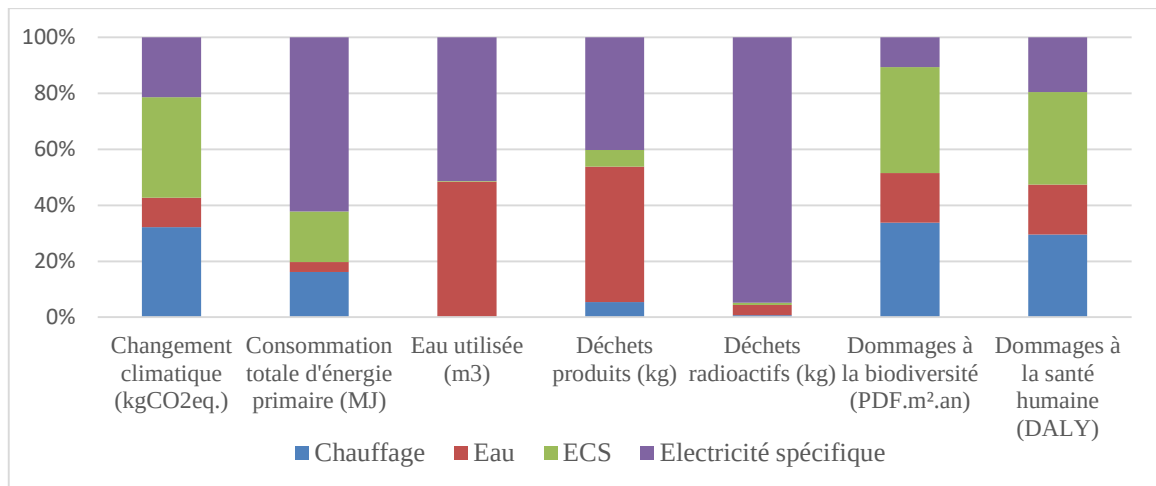


Figure 2-29 : Contribution des types d'usage aux impacts environnementaux

Bien que l'étape d'utilisation du bâtiment soit à l'origine de la majorité des impacts environnementaux, les études et développements actuels dans le secteur du bâtiment se focalisent de plus en plus sur les autres étapes du cycle de vie ; en effet, de nombreuses technologies ont été développées au cours des dernières décennies dans le but de maximiser la performance énergétique des bâtiments au cours de leur utilisation, et les réglementations thermiques évoluent parallèlement en ce sens. La réduction de la consommation énergétique augmente la part des autres étapes du cycle de vie, l'impact environnemental du cycle de vie des matériaux est alors étudié. La contribution des différentes parties du bâtiment est présentée Figure 2-30.

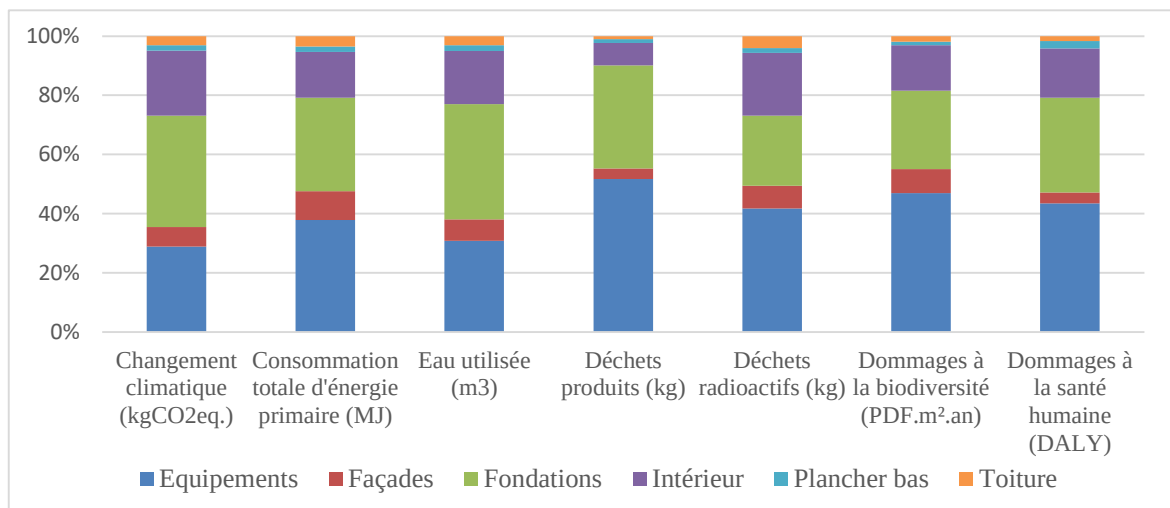


Figure 2-30 : Analyse de contribution des composants du bâtiment

Les équipements et les fondations sont les deux contributeurs majoritaires aux différents impacts environnementaux générés par les composants du bâtiment. La catégorie des fondations contient également l'acier nécessaire à la superstructure, dont la quantité a été estimée en fonction du nombre d'étages du bâtiment. Les équipements correspondent aux équipements sanitaires et électriques du

bâtiment, renouvelés tous les 20 ans excepté les câbles électriques qui ont une durée de vie de 50 ans. La catégorie « intérieur » concerne les cloisons et les planchers intermédiaires, tous deux constitués de béton. Étant donné que le bâtiment comprend 15 étages, la quantité de béton au sein des planchers intermédiaires est conséquente, or sa fabrication et son traitement en fin de vie génèrent des déchets radioactifs de par l'électricité utilisée, et le ciment émet des gaz à effet de serre. Ainsi, cette partie de bâtiment prend une part importante concernant les indicateurs du changement climatique et de la production de déchets radioactifs.

Analyse de contribution d'un bâtiment de bureaux

Le bâtiment de bureaux R2 a été sélectionné afin de détailler le comportement environnemental de cet usage, dont les besoins de chauffage sont très faibles, et les besoins de climatisation non négligeables. De même que l'analyse de contribution du bâtiment L1, la Figure 2-31 montre que l'étape d'utilisation du bâtiment est prédominante par rapport aux étapes de construction, de rénovation et de fin de vie. Cependant, on remarque une légère diminution de la proportion de l'étape d'utilisation sur les différents indicateurs environnementaux par rapport à la même étude effectuée sur les logements. Cette variation traduit le faible besoin de chaleur (chauffage et eau chaude sanitaire) des bâtiments de bureaux, or ce poste contribue fortement aux différents indicateurs de par la composition du réseau de chaleur, comme l'on a pu le montrer dans les paragraphes précédents. Les besoins de climatisation augmentent quant à eux la consommation d'énergie primaire et les déchets radioactifs produits, cependant cette évolution ne se constate pas sur cette analyse de contribution car l'utilisation du bâtiment est également l'étape prépondérante sur ces deux indicateurs dans le cas du bâtiment de logements L1. Ainsi la part relative reste inchangée, tandis que les valeurs de ces indicateurs augmentent considérablement. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire de développer des références environnementales, telles que présentée au paragraphe 1.1.3 de cette thèse, pour que les parties prenantes des projets aient les clés nécessaires pour prendre des décisions en adéquation avec l'ensemble des impacts associés aux projets.

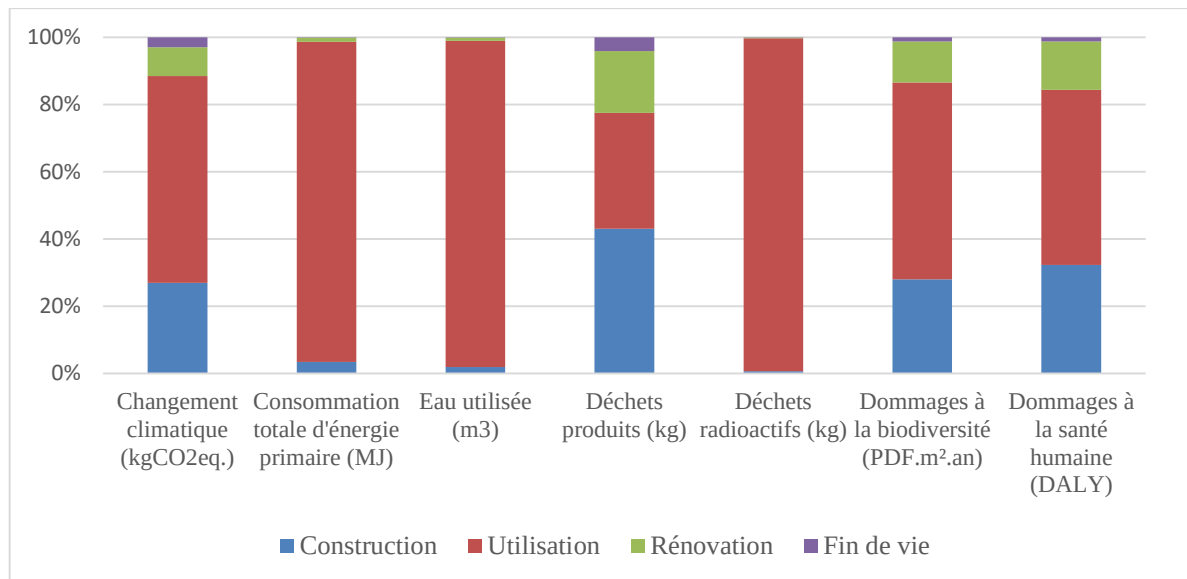


Figure 2-31 : Analyse de contribution des étapes du cycle de vie du bâtiment R2

Pour finir ces analyses d'impacts, on montre la différence de l'importance de l'étape d'utilisation sur le cycle de vie entre le bâtiment de logements L1 présenté dans un premier temps et le bâtiment de bureaux R2. En effet, le bâtiment de bureaux R2 ayant des besoins de chauffage très faibles voire négligeables, la proportion des autres contributeurs que les postes d'utilisation, soient les matériaux et équipements du bâtiment, est alors plus importante. La Figure 2-32 montre que pour certains indicateurs comme les dommages à la santé humaine, à la biodiversité et le changement climatique, l'étape d'utilisation du bâtiment de bureaux n'est responsable que d'environ 60 % des impacts, contrairement aux bâtiments de logements dont l'étape d'utilisation représente au minimum 75 % des impacts. Comme précisé précédemment, l'indicateur de déchets produits déroge à cette règle, car il est en grande partie causé par les déchets provenant de la fabrication de l'acier, utilisé dans les fondations et la superstructure des bâtiments.

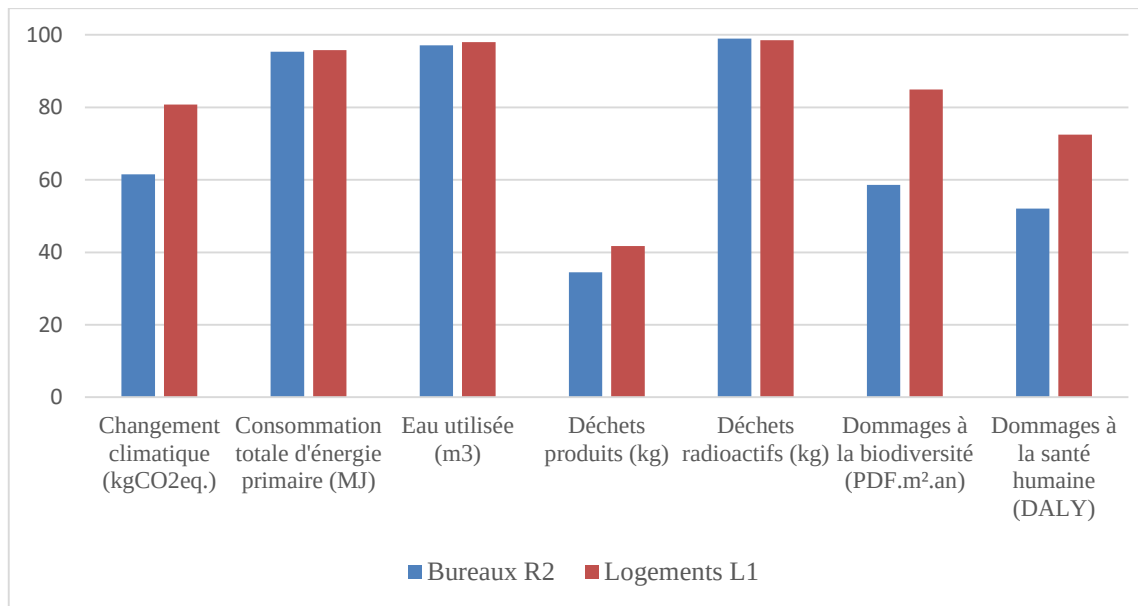


Figure 2-32 : Part de l'étape d'utilisation par rapport à l'ensemble du cycle de vie

Un deuxième phénomène vient expliquer la variation de la part de l'étape d'utilisation entre les bâtiments de logements et de bureaux, outre les besoins de chauffage ; il s'agit des quantités de béton et d'acier nécessaires à la structure des bâtiments. Ces dernières ont été estimées en fonction du nombre d'étages des bâtiments, ainsi le bâtiment de bureaux R2 contenant 26 étages comprend plus de matériaux structurels par m² de plancher que le bâtiment de bureaux L1. La part des impacts associés à ces matériaux structurels par rapport aux composants du bâtiment est présentée Figure 2-33.

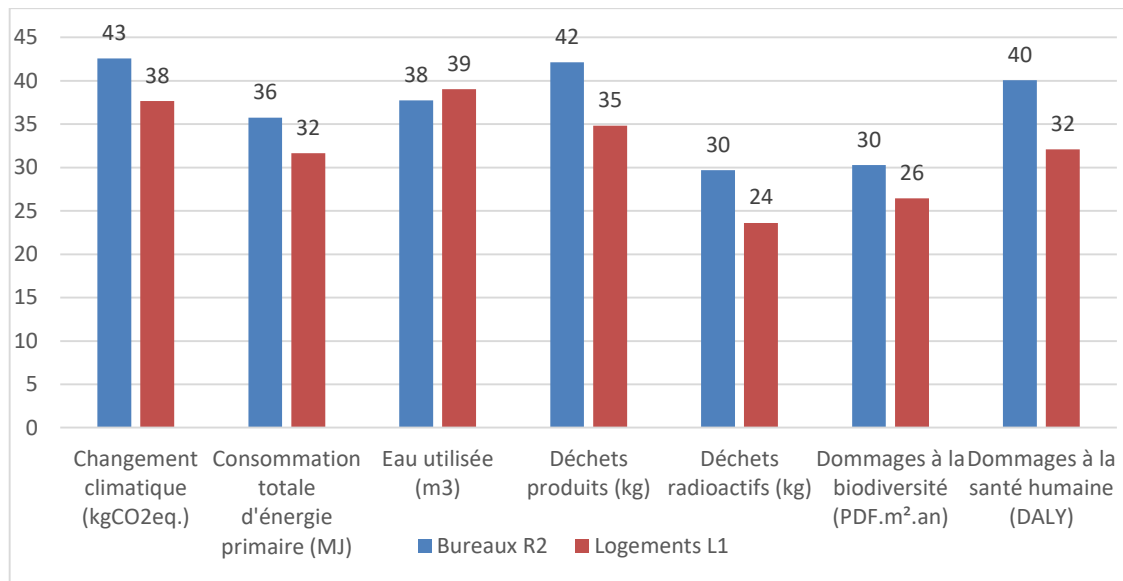


Figure 2-33 : Contribution des fondations et de l'acier de la superstructure à l'ensemble des impacts des composants du bâtiment (en %)

2.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les outils de modélisation utilisés pour la réalisation des simulations thermiques et environnementales des bâtiments, ainsi que les plateformes de simulations multiples STD et ACV qui seront ensuite intégrées à un algorithme d'optimisation multicritère. L'analyse de cycle de vie nécessite la présentation des objectifs, du cadre de l'étude et de l'ensemble des hypothèses associées à la simulation environnementale. Ces éléments ont été présentés en première partie de ce chapitre et seront considérés comme acquis pour le reste de la thèse, sauf indication contraire. Les résultats de l'évaluation environnementale des projets nécessitent des références auxquelles ils peuvent être comparés, comme l'impact environnemental des pires et des meilleures pratiques d'une catégorie de bâtiments. De telles références environnementales sont nécessaires à l'aide à la décision, elles facilitent considérablement l'étape d'interprétation des résultats, qui est la dernière phase de la méthode de l'analyse de cycle de vie, tandis que très peu de travaux présentent de telles références au sein de la littérature scientifique.

La présentation du cas d'étude a également fait l'objet de ce chapitre ; un îlot de bâtiment a été choisi afin d'illustrer l'échelle multibâtiment abordée dans cette thèse. La simulation thermique des différents bâtiments du quartier a montré une différence de comportement entre les différents usages de bâtiments, les logements et les bureaux. Une première ACV a été réalisée sur l'ensemble du quartier à partir des hypothèses précisées en première partie ; l'étape d'utilisation est l'étape prépondérante, cependant la réduction des besoins de chauffage mène à une augmentation de la part des matériaux et des équipements sur les impacts environnementaux d'un bâtiment, d'où l'importance de considérer

l'ensemble du cycle de vie. De plus, les matériaux structurels sont responsables d'une grande partie des impacts des composants des bâtiments, il est nécessaire d'estimer leur quantité à l'aide d'un pré-dimensionnement en phase amont comme présenté dans ce chapitre, et d'intégrer les matériaux avec les quantités correspondantes à l'évaluation environnementale du bâtiment.

Les bases nécessaires à la simulation thermique et à l'analyse de cycle de vie ayant été établies, le chapitre suivant présentera le développement d'une méthode d'optimisation environnementale multicritère multibâtiment. L'algorithme d'optimisation initialement développé par Kocliko et désormais intégré à Pleiades dans le module Amapola a été complété afin de prendre en compte les impacts sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, et deux méthodes permettant d'optimiser plusieurs bâtiments en parallèle ont été comparées afin de sélectionner la plus performante pour la suite de cette thèse et potentiellement la suite des développements concernant le logiciel. De plus, l'implémentation de différents indicateurs environnementaux a permis d'optimiser les bâtiments sur d'autres critères environnementaux que les émissions de gaz à effet de serre, ce qui correspond à une innovation importante au sein de la littérature scientifique.

Les notions présentées dans ce chapitre permettront également de développer le quatrième chapitre, au cours duquel nous étudierons l'influence de la forme des bâtiments. Enfin, certaines hypothèses seront discutées au sein du cinquième chapitre en vue d'analyser la sensibilité des résultats obtenus.

3 Optimisation environnementale multicritère multibâtiment

Dans ce chapitre, une procédure d'optimisation environnementale multicritère est établie à l'échelle multibâtiment. La méthode est ensuite appliquée sur un bâtiment du cas d'étude afin de présenter les résultats d'optimisation de différents critères environnementaux et du critère économique. Enfin, une application de la méthode avec une contrainte imposée est présentée.

3.1 Développement d'un algorithme d'optimisation multibâtiment

L'impact environnemental des bâtiments à l'échelle des projets d'aménagement urbain est de plus en plus pris en compte par les aménageurs, notamment avec l'apparition de la RE 2020 imposant des niveaux de performance qui vont au-delà d'une approche purement énergétique, en faisant intervenir le calcul des émissions de gaz à effet de serre (GES) et la notion de cycle de vie. Cependant cet impact est très souvent mis en opposition au coût économique que les projets engendrent. Or il existe des compromis entre les différents critères environnementaux étudiés et le coût économique des projets, la difficulté se trouvant uniquement dans la détermination de ces compromis, qui se complexifie avec le nombre de critères pris en compte. Une procédure d'optimisation multicritère à l'échelle du quartier permet dans ce cas d'identifier les meilleures variantes de bâtiments sur les critères souhaités et constitue une aide à la décision.

La problématique de l'optimisation environnementale des bâtiments a peu été traitée pour le moment, d'autant moins à l'échelle du quartier. Les études existantes d'optimisation d'un bâtiment se concentrent généralement sur l'aspect énergétique, économique et plus rarement sur les émissions de GES engendrées, mais ne portent souvent que sur l'étape d'utilisation (Ascione et al., 2019 ; Schwartz et al., 2016 ; Saner et al., 2014). D'autres développements proposent une optimisation multi-objectif sans tenir compte du coût d'investissement (Kiss et Szalay, 2020).

Nous souhaitons étendre l'optimisation environnementale des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie à différents critères environnementaux ainsi qu'à l'échelle du quartier. Le développement d'une telle procédure d'optimisation nécessite d'une part une réflexion autour des temps de calculs, qui peuvent croître très rapidement et empêcher l'utilisation d'un outil d'optimisation, et d'autre part la mise en place d'une méthode performante. Deux approches sont envisageables afin de répondre à cette problématique. D'une part les bâtiments peuvent être optimisés séparément, dans une approche monobâtiment, les résultats sont ensuite agrégés en post-traitement afin de déterminer les meilleures solutions. D'autre part une démarche d'optimisation simultanée est développée, dans ce cas les bâtiments sont évalués en parallèle à chaque génération créée par un algorithme génétique, les résultats sont regroupés à chaque évaluation. Nous comparerons dans un premier temps ces deux approches afin de trouver la méthode la plus adaptée à l'optimisation des bâtiments à l'échelle du quartier. Les deux approches d'optimisation implémentent l'algorithme génétique élitiste NSGA-II, il sera présenté en détail dans la première partie de ce chapitre.

Dans le cadre du choix de la méthodologie, nous travaillons dans un premier temps avec deux fonctions objectifs : le coût financier et la quantité d'émissions de GES associés aux projets. D'autre part, afin de préparer le passage à l'échelle du quartier tout en évitant d'engendrer des temps de calcul

trop importants, nous choisirons d'effectuer l'étude sur deux bâtiments du cas d'étude, à usages différents.

Enfin, la suite de ce chapitre portera sur l'application de la méthode sélectionnée au cas d'étude afin de trouver des variantes optimales selon des critères environnementaux et économiques.

3.1.1 Présentation de la démarche

3.1.1.1 Généralités

L'optimisation d'un problème consiste à chercher la ou les meilleures solutions existantes selon les critères définis. Pour cela il est possible de faire une recherche exhaustive si l'espace de décision est réduit, ou de passer par un algorithme, méthode privilégiée dans le cas des problèmes de grande dimension et de fonctions objectifs dont l'évaluation est complexe et coûteuse en temps de calcul. La méthode de calcul heuristique permet de fournir rapidement une solution acceptable d'un problème d'optimisation complexe ; ce type d'analyse ne fournit pas nécessairement les solutions optimales, l'algorithmique heuristique reflète les vertus de l'approximation. Il existe de nombreuses méthodes approchées, comme les méthodes par construction (algorithmes gloutons), par décomposition, les méthodes de voisinage ou encore les méthodes à base de population. L'approche méta-heuristique correspond à un niveau au-dessus (méta) de l'approche heuristique ; il s'agit alors d'un algorithme d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficiles pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace. Les méta-heuristiques sont souvent fondées sur un échantillonnage probabiliste, et inspirées par des systèmes naturels. C'est le cas des algorithmes évolutionnaires, qui font partie des méthodes à base de population, évaluant plusieurs solutions en parallèle.

L'origine de l'algorithme évolutionnaire vient du Darwinisme, la théorie de l'évolution biologique des espèces par la sélection naturelle ; les espèces évoluent légèrement au cours des générations de manière à conserver et accumuler les variations qui leurs sont utiles, pour améliorer les espèces vivantes dans leurs conditions d'existence. Les principes d'évolution organique sont ainsi utilisés comme technique d'optimisation globale, c'est le Darwinisme artificiel. L'algorithme évolutionnaire imite les phénomènes d'apprentissage collectifs des populations en effectuant des sélections et des opérations génétiques sur les populations. La sélection repose sur une fonction qui ne nécessite pas de critère de continuité ni de dérivabilité.

Différents types d'algorithmes évolutionnaires existent ; par exemple les niches écologiques permettent de détecter plusieurs optimums à travers le maintien de la diversité génétique, la restriction des croisements et le partage des ressources. Dans le cas d'un algorithme basé sur la colonisation autour des optimums, les solutions se regroupent autour d'optimums locaux. La coévolution coopérative est un autre exemple d'AE, cette méthode peut introduire une évaluation locale des solutions, en plus de

l'évaluation globale. Enfin, l'algorithme sélectionné dans le cadre de cette thèse est un algorithme multi-objectif évolutionnaire, plus précisément l'algorithme génétique élitiste de tri non-dominé NSGA-II, permettant d'obtenir les solutions non dominées au sens de Pareto. L'élitisme consiste à garder en mémoire les meilleurs individus de la population courante, quelle que soit la génération d'origine de l'individu. Ainsi, un individu très performant peut faire partie de la population courante pendant plusieurs générations s'il fait toujours partie des meilleures solutions. Cet élitisme favorise la concentration de la population autour des solutions performantes, et contribue donc à la convergence de l'algorithme. L'intensification est un autre critère de convergence de l'algorithme, qui doit tout de même être compensé par une diversification, permettant d'assurer l'exploration de l'ensemble de l'espace de recherche, notamment en atteignant les solutions correspondant aux meilleures et aux pires performances concernant les différents critères optimisés. Pour cela, la sélection dans l'algorithme NSGA-II repose sur la mesure de la distance d'une solution par rapport aux solutions voisines de même rang ; plus cette distance est grande, plus la solution se distingue de ses voisines, et l'inclure dans la population suivante est pertinente et favorise la diversification. Les paragraphes suivants présentent les notions nécessaires à la compréhension du fonctionnement de l'algorithme, ainsi que son implémentation informatique dans les travaux d'optimisation environnementale multibâtiment.

3.1.1.2 Vocabulaire et définitions

Un algorithme évolutionnaire permet la recherche d'un ensemble de solutions optimales à partir d'un espace de recherche contenant toutes les combinatoires possibles. Ces solutions sont appelées des individus. Dans le cas de l'application de l'optimisation multicritère aux bâtiments, une variante de bâtiment correspond à un individu, et l'ensemble des individus évalués au cours d'une génération forment une population. De même que les espèces vivantes, les individus sont décrits par un ou plusieurs chromosomes qui contiennent le code de la solution, lui-même établi à partir des variables de décision du problème d'optimisation, correspondant aux gènes. Ces derniers peuvent se décomposer en plusieurs catégories, selon la nature des allèles qui les composent. Les gènes discrets représentent des variables de décision dont les valeurs sont discrétisées, par exemple l'épaisseur de l'isolant, variant de 1 cm à 30 cm avec un pas de 5 cm. Les gènes catégoriels permettent de modifier un paramètre, comme le type de fenêtre par exemple. Enfin, de même que l'évolution des espèces biologiques, les populations d'individus évoluent au cours des générations, ainsi une génération correspond à une itération de l'optimisation. Les étapes intervenant dans la boucle générationnelle sont illustrées à la Figure 3-1, reprenant les différentes étapes des outils de simulations multiples STD et ACV présentés au paragraphe 2.1.2.2.

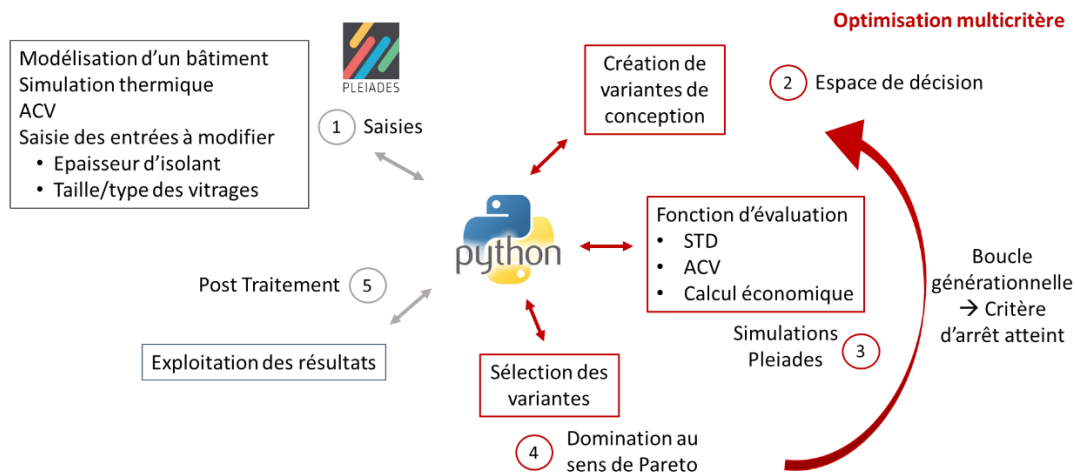


Figure 3-1 : Mise en évidence de la boucle générative au cours de la procédure de simulations multiples

La distance mesurée entre les solutions permettant la diversification de ces dernières est nommée la distance de *crowding*. Elle est définie par Deb (2011) comme le périmètre du cuboïde formé en utilisant les solutions les plus proches dans l'espace objectif comme sommets, et est illustrée à la Figure 3-2.

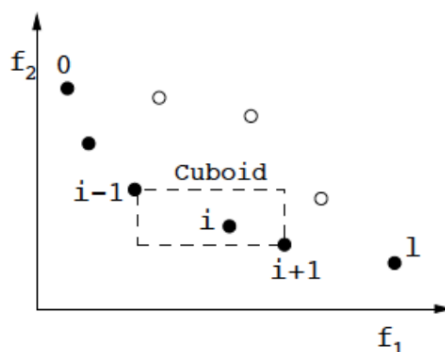


Figure 3-2 : Calcul de la distance de *crowding* (Deb, 2011)

3.1.1.3 Fonctionnement de l'algorithme

Le code informatique sur lequel se base cette thèse provient de l'implémentation des travaux de Rivallain (2013) et de Recht (2016) dans l'outil Amapola, module de Pleiades, par l'entreprise Kocliko et en collaboration avec Izuba, développeur de Pleiades. Ces travaux ont intégré l'algorithme évolutionnaire non élitiste NSGA-II à l'optimisation multicritère des bâtiments. Son fonctionnement est décrit ci-après.

❖ Initialisation de la population

La première étape d'une optimisation consiste à définir un échantillonnage de l'espace de recherche afin d'introduire les premiers individus. La population initiale d'un algorithme génétique provient

souvent d'un tirage aléatoire au sein des individus de l'espace de décision. Cependant, le caractère aléatoire peut concentrer les individus à certains endroits de l'espace de décision, alors que la diversité des individus est à privilégier pour débiter une optimisation multicritère. La méthode d'échantillonnage quasi-aléatoire par séquence de Sobol construit une suite de points couvrant l'espace de décision de manière régulière, évitant ainsi la concentration des individus à certains endroits de l'espace. Cette approche a été intégrée au code d'optimisation multicritère au cours de la thèse de Frossard (2020). Sa pertinence a été démontrée, l'algorithme présente de meilleures solutions au cours des premières générations.

❖ Sélection pour reproduction

La population résultant de la précédente boucle générationnelle effectuée, ou la population initiale dans le cas de la première génération de l'optimisation, est considérée comme point de départ de cette étape et ses individus sont appelés les parents. La population est tout d'abord dupliquée ; un placement aléatoire des individus est alors appliqué à chacune des deux populations qui contiennent ainsi les mêmes individus mais dans un ordre différent. Les individus de chaque population sont ensuite sélectionnés quatre par quatre, et comparés deux à deux. La comparaison des individus deux à deux se fonde sur les notions de domination et de distance de *crowding*. La démarche algorithmique est la suivante.

Soient deux individus consécutifs d'une population.

Si l'un des deux domine l'autre, **alors** il est sélectionné.

Sinon **si** l'un des deux a une distance de *crowding* supérieure, **alors** il est sélectionné.

Sinon la sélection se fait de manière aléatoire.

Si l'on nomme *A* et *B* les deux populations comprenant les mêmes individus, placés dans un ordre différent, les deux premiers individus de la population *A* sont comparés et l'individu résultant est ajouté à une nouvelle population que l'on nommera *sélection_tournoi*. Les deux individus suivants de la population *A* sont ensuite comparés, et l'individu résultant est également ajouté à *sélection_tournoi*. La même procédure est ensuite appliquée aux deux premiers couples d'individus de la population *B*. L'analyse de ces huit individus (quatre dans chaque population) mène donc à l'ajout de quatre individus dans la population *sélection_tournoi*. Cette méthode est appliquée à l'ensemble des individus des deux populations par l'intermédiaire d'une boucle itérative. Le nombre d'individus au sein de chaque population doit nécessairement être un multiple de quatre ; ce paramètre est défini préalablement à l'optimisation par l'utilisateur car il est propre à chaque problème.

Ainsi découle une nouvelle population, comprenant le même nombre d'individus que la population initiale de parents. La comparaison des individus deux à deux a permis une première sélection, dans laquelle les solutions non dominées ont statistiquement plus de chance d'apparaître deux fois, et les

solutions non dominées, ou peu performantes (vis-à-vis de leur distance de *crowding*) n'apparaissent probablement pas. Cela va améliorer la performance des étapes suivantes.

❖ Croisement et mutation génétiques

Les étapes de croisement et de mutation des individus sont très bien illustrées par le système de reproduction des espèces, dont nous allons reprendre certains termes. La démarche est appliquée aux individus deux par deux, nommés les parents, à travers une boucle itérative décrite ci-après. Les opérateurs de croisement et de mutation sont soumis à une probabilité, appelée taux de croisement et taux de mutation. La boucle itérative est appliquée uniquement si le taux est respecté. Cela se traduit par une génération aléatoire d'un chiffre décimal entre 0 et 1, la boucle étant exécutée uniquement si ce chiffre est inférieur aux taux respectifs.

❖ Opérateur de croisement

L'opération de croisement diffère selon le type de gène, discret ou catégoriel dans notre cas.

Si le gène est discret, alors un croisement barycentrique arrondi est effectué sur les deux parents. La moyenne de la valeur de chacun des allèles est calculée puis arrondie afin de correspondre à un allèle existant dans l'espace de décision.

Si le gène est catégoriel, alors le croisement est métissé. Si les parents avaient le même allèle, alors c'est celui-ci qui est sélectionné. Sinon, les deux allèles des parents sont réattribués aux enfants, seul l'ordre fait l'objet d'un classement aléatoire entre le premier et le deuxième individu enfant.

❖ Opérateur de mutation

Une mutation polynomiale est appliquée si le gène est discret. Sur le même principe que l'opération de croisement, le chiffre obtenu suite à la mutation polynomiale est arrondi afin de correspondre à un allèle de l'espace de décision.

La gestion des gènes catégoriels est faite par une mutation uniforme forcée ; si le chiffre aléatoire généré est inférieur au taux de mutation, alors on attribue à l'allèle une nouvelle valeur, elle aussi générée aléatoirement, en imposant la condition qu'elle soit différente de la valeur initiale. Si l'allèle est identique, alors un nouvel allèle est généré aléatoirement, et ce jusqu'à ce que l'allèle soit différent.

Une fois les opérations de croisement et de mutation effectuées sur une paire d'individus, deux nouveaux individus font désormais partie de la population des enfants, et les deux opérations décrites ci-dessus sont reconduites sur la paire de parents suivante. Cette étape de l'algorithme impose donc un nombre d'individus pair, ce qui n'implique pas de contrainte supplémentaire à l'hypothèse nécessaire faite suite à la sélection pour reproduction, qui imposait un nombre d'individus égal à un multiple de quatre.

❖ Évaluation des enfants

L'étape d'évaluation consiste à calculer le phénotype des enfants obtenus suite aux opérations de croisement et de mutation. Les fonctions objectifs de l'optimisation sont évaluées, les valeurs donnant les informations nécessaires au fonctionnement de l'algorithme, correspondant à la performance de chaque solution. Les grandeurs d'intérêt définies en amont de l'optimisation peuvent également être évaluées ; elles n'interviennent pas dans la sélection des solutions optimales, mais permettent de compléter les résultats par des données nécessaires à l'analyse thermique et environnementale d'un bâtiment.

❖ Sélection pour remplacement

La population créée au cours de la génération a donné lieu à des enfants, générés à partir de leurs parents. Le caractère aléatoire des différentes étapes des opérations effectuées implique une dernière sélection ; deux populations sont de nouveau considérées, la population de parents et la population d'enfants, récemment créée et évaluée. Les deux populations regroupées ont dans ce cas deux fois plus d'individus que la population finale. La dernière étape consiste à trier de manière conjointe les enfants et les parents, et de les classer par front de Pareto, donc par relation de domination ; toutes les solutions non dominées appartiennent au front de Pareto principal et sont implémentées dans la nouvelle population. Ensuite, les solutions du front de Pareto principal sont enlevées, le nouveau front de Pareto contient de nouvelles solutions, initialement dominées mais désormais non dominées. Elles appartiennent au front de Pareto n°2. Toutes les solutions sont ainsi classées par front de Pareto, et ajoutées à la population finale de la génération, jusqu'à ce que le nombre d'individus souhaités soit obtenu. Si l'ajout d'un front de Pareto dépasse ce nombre d'individus, alors ces solutions sont triées par distance de *crowding* décroissante avant d'être ajoutées à la population, jusqu'à ce que le nombre exact d'individus souhaités soit atteint. Les solutions les moins performantes sont alors supprimées, et la population résultante a deux options :

- Si le critère d'arrêt n'est pas atteint, alors la population sélectionnée est introduite dans la nouvelle boucle générationnelle et correspondra aux parents.
- Si le critère d'arrêt est atteint, alors les solutions non dominées de la population sélectionnée pour le remplacement forment le front de Pareto final de l'optimisation.

Ainsi, si une solution non dominée est introduite dès l'échantillon initial, elle devrait persister au cours des générations, notamment grâce à la sélection pour remplacement qui garde en mémoire les parents afin de conserver les meilleures solutions malgré le caractère aléatoire de l'algorithme.

Le fonctionnement de l'algorithme décrit ci-dessus est résumé dans le schéma de la Figure 3-3, et l'étape d'évaluation des enfants est détaillée par la suite.

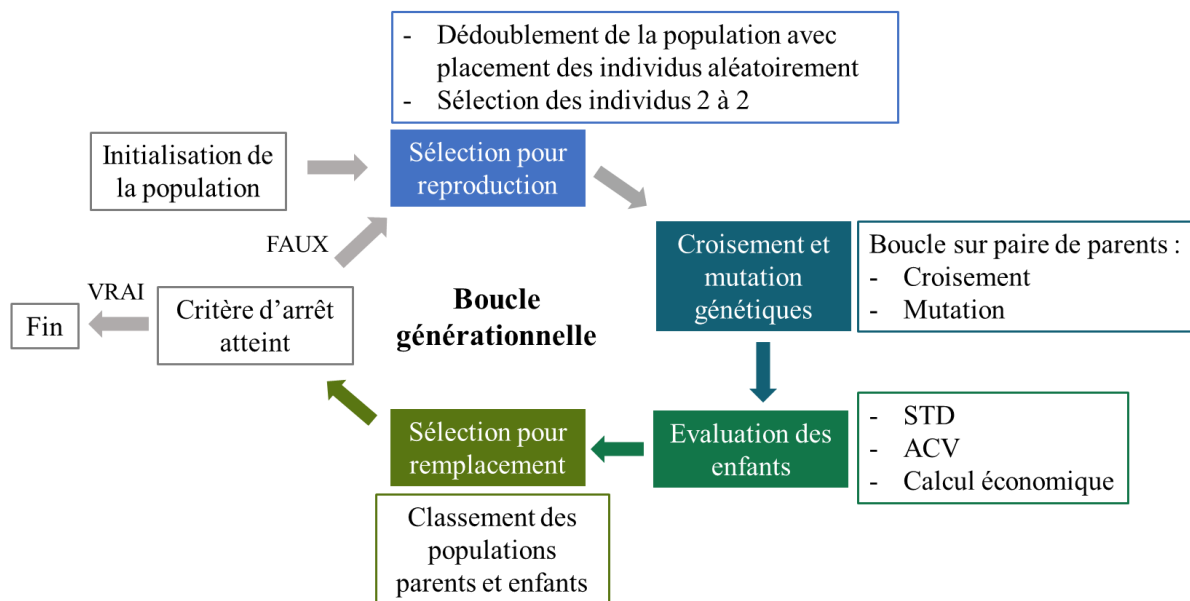


Figure 3-3 : Fonctionnement de l'algorithme évolutionnaire NSGA-II

3.1.1.4 Évaluation des solutions

L'évaluation des enfants est une étape primordiale de l'algorithme, sans laquelle les sélections et différentes opérations d'amélioration du front ne pourraient pas être effectuées. Les outils utilisés sont décrits dans le chapitre 2, les caractéristiques thermiques de chaque individu sont calculées, puis les performances environnementales associées sont évaluées. Dans un premier temps, le tirage STD est mis en forme à partir des allèles de la population. Puis la Blackbox STD est appelée afin de calculer les performances thermiques de chaque solution. Les simulations sont parallélisées, le temps de calcul dépend donc de la performance de l'ordinateur utilisé, et du temps de la simulation thermique des bâtiments évalués. Chaque simulation fournit tous les résultats thermiques dans un dictionnaire Python, notamment les besoins de chauffage et d'ECS qui sont nécessaires au calcul des impacts environnementaux.

L'échantillonnage est ensuite formaté pour correspondre à un tirage ACV lisible par la Blackbox ACV, comme expliqué au chapitre 2 de cette thèse. Ce dernier regroupe les données d'entrées de la Blackbox ACV et indique les quantités des matériaux qui ont été modifiées par rapport à la variante initiale. Les quantités initiales des matériaux faisant l'objet de modifications diverses au cours de l'optimisation sont également renseignées afin de calculer précisément les impacts environnementaux de chaque variante. En effet, la variation de la taille des vitrages entraîne une variation de la surface de parois verticales opaques ; la quantité de matériaux des murs extérieurs est alors indiquée dans le fichier tirage ACV, recalculée à partir du volume initial qui a été renseigné, et de la taille des vitrages.

Afin d'augmenter les degrés de liberté, ce développement s'affranchit de la Blackbox ACV pour le calcul des impacts environnementaux de l'étape d'utilisation du bâtiment. Les besoins de chauffage, de

climatisation, d'ECS et les consommations d'électricité spécifique et auxiliaire sont stockés dans le dictionnaire de résultats créé suite à l'évaluation thermique des variantes. Les impacts environnementaux associés sont calculés en fonction du type de mix électrique choisi, attributionnel ou conséquentiel, de l'année d'évaluation (modèle récent ou prospectif) et du système énergétique implémenté. Le choix d'effectuer le calcul des impacts environnementaux de l'étape d'utilisation dans le code python permet d'éviter les contraintes des paramètres imposés par l'interface Pleiades ACV. L'évaluation environnementale est donc adaptée au cas d'étude et aux objectifs de l'optimisation, différents développements ont pu être menés au cours de cette thèse, ils sont décrits ci-après et dans le chapitre 5.

3.1.1.5 Description des méthodes

L'optimisation multicritère environnementale des bâtiments à l'échelle de l'îlot impose une réflexion quant à la méthode de désagrégation des bâtiments. L'échelle multibâtiment met en évidence deux approches intégrant l'algorithme NSGA-II décrit précédemment. Elles sont détaillées ci-après.

- Méthode monobâtiment

Cette méthode consiste à appliquer la procédure d'optimisation multicritère détaillée précédemment à chaque bâtiment concerné, les solutions à l'échelle multibâtiment sont ensuite déterminées par l'intermédiaire d'un post-traitement. Ce dernier a été élaboré au cours de cette thèse ; toutes les solutions non dominées résultant de l'optimisation multicritère des différents bâtiments sont dans un premier temps combinées de manière exhaustive, puis triées au sens de Pareto. Dans le cas d'une optimisation à deux critères (émissions de GES et coût d'investissement par exemple) de deux bâtiments A et B, l'ensemble des valeurs d'émissions de GES du bâtiment A sont additionnées deux à deux avec les émissions de GES du bâtiment B afin d'obtenir toutes les combinaisons possibles d'association des bâtiments A et B ; en parallèle, cette combinatoire est également générée pour les valeurs de coût d'investissement. Ensuite, chaque nouveau binôme correspondant à la somme des émissions de GES et du coût d'investissement de deux solutions est placé dans une liste, qui est alors triée, et l'ensemble des solutions non dominées au sens de Pareto correspond au nouveau jeu de solutions. Ces dernières sont toutes composées d'un individu du bâtiment A et d'un individu du bâtiment B. La combinaison des solutions non dominées de deux bâtiments A et B, au regard de deux objectifs, est illustrée Figure 3-4. L'ensemble des solutions combinées des deux fronts de Pareto sont visibles en rouge sur la figure, et le trait en pointillé présente le nouveau front de Pareto, comprenant les solutions non dominées de la combinaison des deux fronts initiaux. Afin d'éviter une complexité de calcul trop importante si le nombre de bâtiments est conséquent, dans des 13 bâtiments du quartier des Lumières par exemple, il est possible de calculer les solutions non dominées de deux bâtiments, puis de combiner le nouveau jeu de solutions non dominées de ce premier post-traitement avec les solutions non dominées du troisième bâtiment, etc.

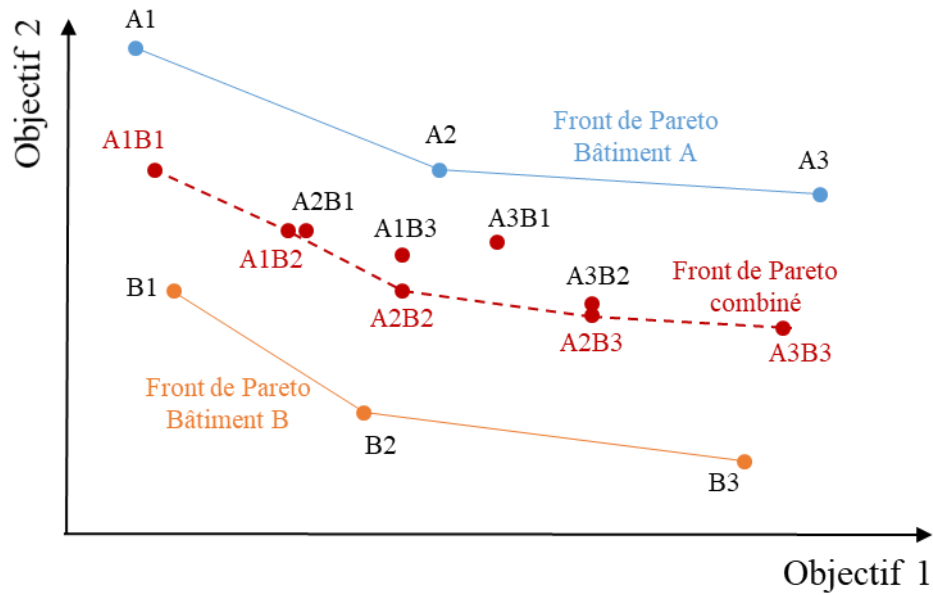


Figure 3-4 : Combinaison des solutions non dominées résultant de deux optimisations de bâtiments

- Méthode multibâtiment

Cette approche a été développée au cours de cette thèse ; elle consiste à évaluer simultanément les bâtiments au cours de l'optimisation, cela nécessite une implémentation numérique au sein de l'algorithme. À chaque génération, une population par bâtiment optimisé est considérée. Dans le cas de l'optimisation simultanée de deux bâtiments, deux populations sont sélectionnées initialement pour la reproduction et chacune d'entre elles évolue au cours des mutations et des croisements réalisés. L'évaluation des enfants est effectuée sur chacune des deux populations, puis la sélection est réalisée sur la somme des valeurs des fonctions objectifs de chacun des deux bâtiments. Les solutions sont ensuite triées au sens de Pareto, et deux nouvelles populations sont sélectionnées pour le remplacement. L'optimisation multibâtiment n'est donc pas exactement équivalente à deux optimisations monobâtiment, ces deux approches diffèrent après l'étape d'évaluation des enfants. Elle a l'avantage de ne pas nécessiter de post-traitement car chaque solution du front correspond à un couple d'individus, soit un par bâtiment.

3.1.1.6 Hypervolume

Afin d'évaluer la qualité des résultats, particulièrement en terme de diversité et d'intensité du front, l'hypervolume peut être calculé (Knowles et Corne, 2002). En post-traitement, il permet de comparer deux fronts de Pareto finaux, ainsi que l'évolution des fronts au cours des générations d'une optimisation. Dans le cas d'une recherche d'un minimum global, l'hypervolume augmentera jusqu'à

Chapitre 3. Optimisation environnementale multicritère multibâtiment

son maximum, correspondant au meilleur jeu de solutions, composé de variantes de bâtiments diverses, dont les valeurs des différents critères sont les plus faibles.

L'algorithme d'optimisation multicritère multibâtiment est limité par un critère d'arrêt correspondant à un nombre de générations préalablement défini. L'hypervolume peut également être utilisé comme critère d'arrêt en stoppant l'optimisation lorsque la convergence est atteinte. Cette méthode permet d'assurer une convergence globale de l'algorithme sans engendrer des temps de calcul inutiles, elle est cependant très sensible à la valeur choisie du point de référence. En multicritère, le point Nadir est le point de l'espace dont les coordonnées sont les bornes des critères du problème d'optimisation considéré. En minimisation multicritère, ses coordonnées correspondent aux bornes supérieures des critères d'optimisation. Ce point n'est généralement pas une solution du problème d'optimisation, c'est la combinaison des pires solutions existant au sein l'espace de recherche sur les différents critères. L'hypervolume peut être calculé à partir du point Nadir, ou en utilisant la pire solution de chaque génération. En pratique, le point Nadir n'est pas calculé du fait de la complexité de la combinatoire, on le remplacera par un point de référence dont les coordonnées sont obtenues à partir des pires solutions évaluées.

Dans ce travail, l'hypervolume est implémenté en post-traitement afin d'évaluer la qualité des résultats et de permettre la comparaison des différentes optimisations.

3.1.1.7 Cas d'étude

Dans ce premier travail visant à déterminer la méthodologie adéquate à l'optimisation des bâtiments d'un quartier, le cas d'étude considéré est composé de deux bâtiments d'usages différents. Il s'agit des deux bâtiments du quartier des Lumières présentés au paragraphe 2.3.1 : le bâtiment de logements collectifs L1, et le bâtiment de bureaux R2. La définition optimale des zones thermiques présentée au paragraphe 2.3.2 a été appliquée, ainsi le bâtiment de logements comprend 4 zones et le bâtiment de bureaux en comprend 8. La composition de l'enveloppe est présentée dans le Tableau 3-1, dans lequel l'épaisseur et la conductivité thermique des différents matériaux sont précisées. Les besoins de chauffage ont été calculés à partir des scénarios de fonctionnement du cas de base définis dans le paragraphe 1.3.1, ils s'élèvent respectivement à 24 kWh/m²/an et 0,5 kWh/m²/an pour les bâtiments L1 et R2.

Tableau 3-1 : Composition de l'enveloppe des bâtiments du cas de base

Composition	Matériau	Épaisseur (cm)	Conductivité (W/m/K)
Mur extérieur	Panneau de particules bois	2	0,15
	Laine de verre	15	0,051
	Béton lourd	20	1,75
	Placoplatre BA 13	1,3	0,25
Plancher bas	Polystyrène expansé	15	0,039
	Béton lourd	20	1,75
	Carrelage	1	0,7
Mur intérieur	Béton lourd	20	1,75
Plancher intermédiaire	Béton lourd	20	1,75
Toiture	Bitume pur	0,5	0,170
	Polyuréthane	15	0,030
	Béton lourd	20	1,750
	Placoplatre BA 13	1,3	0,325

Le projet du quartier des Lumières étant en phase esquisse, la même enveloppe est considérée pour les deux bâtiments du cas d'étude. Les scénarios d'usage des logements et des bureaux établis au chapitre 2 sont implémentés, et les masques proches induits par les autres bâtiments du quartier sont pris en compte. Toutes les hypothèses pour l'ACV décrites au chapitre 2 sont également appliquées à cette étude.

3.1.2 Espace de décision

Les variables de décision de l'optimisation multicritère considérées dans ce cas d'étude sont l'épaisseur des isolants, le type et la taille des vitrages. Les coûts d'investissement selon ces trois variables permettant l'évaluation du critère économique proviennent des données collectées dans le cadre du projet ANR REHA-PARCS (Pannier et al., 2021). Les variations d'épaisseur d'isolant et de la taille des ouvertures sont représentées par des gènes discrets, dont la description des allèles est présentée dans le Tableau 3-2. La description des fenêtres est faite à partir de quatre variables de décision, selon

Chapitre 3. Optimisation environnementale multicritère multibâtiment

l'orientation des façades. Ainsi, les solutions de l'optimisation peuvent contenir des fenêtres de taille et de typologie différentes au sein d'un même bâtiment, mais une homogénéité est imposée au sein d'une façade. La variable de décision correspondant au type des fenêtres est représentée par un gène catégoriel, les caractéristiques thermiques et le coût des différents types de fenêtres sont détaillés Tableau 3-3.

Tableau 3-2 : Épaisseurs d'isolants et types de fenêtres de l'espace de recherche

Paramètre	Unité	Variation	Prix
Épaisseur de laine de verre - murs extérieurs	cm	1, 7, 10, 15, 20, 25 et 30	De 100 à 112 €/m ²
Épaisseur de polystyrène expansé - plancher bas	cm	1, 7, 10, 15, 20, 25 et 30	De 30 à 65 €/m ²
Épaisseur de polyuréthane - toiture	cm	1, 7, 10, 15, 20, 25 et 30	De 55 à 109 €/m ²
Pourcentage de surfaces vitrées	%	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	

Tableau 3-3 : Caractéristiques thermiques et économiques des fenêtres

Type de vitrage	U_w (W/(m ² .K))	S_w	Cadre	Coût
Double vitrage	1,7	0,55	Bois	450 €/m ²
Triple vitrage	1,095	0,41	Bois	615 €/m ²

3.1.3 Choix de la méthode

Lors des réunions avec les décideurs (la municipalité, l'urbaniste et les ingénieurs du projet), il a été convenu d'optimiser les principaux paramètres de conception dans cette première phase du projet : l'épaisseur de l'isolation, le type et la taille des fenêtres (le pourcentage de vitrage par rapport à la surface de la façade) ont été choisis comme paramètres d'optimisation. Les coûts d'investissement liés à ces paramètres ont été établis en fonction des données recueillies dans des projets antérieurs. L'optimisation a été réalisée avec 100 individus et 20 générations, et un taux de croisement de 0,9 a été choisi, ainsi qu'un taux de mutation de 0,15 (Recht, 2016). Ce paramétrage fera ensuite l'objet d'une correction suite à l'étude du paramétrage optimal de la méthode choisie. Le critère économique est présenté comme un "delta investissement" qui correspond à l'écart de coût de construction entre la solution et le projet

initial. L'unité fonctionnelle sélectionnée est un bâtiment résidentiel de 6977 m² et un bâtiment de bureaux de 33400 m² avec un niveau de confort défini, considérant le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la production d'eau potable, le traitement des eaux usées, la ventilation et les consommations d'électricité spécifique.

Dans cette partie nous discuterons des deux méthodologies introduites dans la sous-section précédente, et nous appellerons multibâtiment l'approche optimisant deux bâtiments simultanément, et monobâtiment l'approche optimisant les bâtiments séparément, combinant les résultats de l'optimisation de chaque bâtiment en post-traitement.

Les résultats sont présentés sous la forme de fronts de Pareto illustrant l'impact environnemental en fonction du critère économique. Le critère environnemental est global sur l'ensemble sur cycle de vie du bâtiment ; le critère économique quant à lui est restreint à la différence du coût de construction par rapport au cas de base. Ainsi, seul le coût des éléments compris dans les variables de décisions nécessite d'être indiqué, cela permet un gain de temps considérable lors de la saisie, et permet de se focaliser uniquement sur les changements possibles. Dans cette étude de cas, les données de coût accessibles ne seraient pas suffisantes pour estimer le coût global du bâtiment modélisé.

3.1.3.1 Convergence de l'algorithme

L'évolution des fronts de Pareto du bâtiment résidentiel et du bâtiment de bureaux au cours des générations sont présentées respectivement à la Figure 3-5 et à la Figure 3-6. Nous observons une convergence très rapide dans le cas de ces deux optimisations monobâtiment.

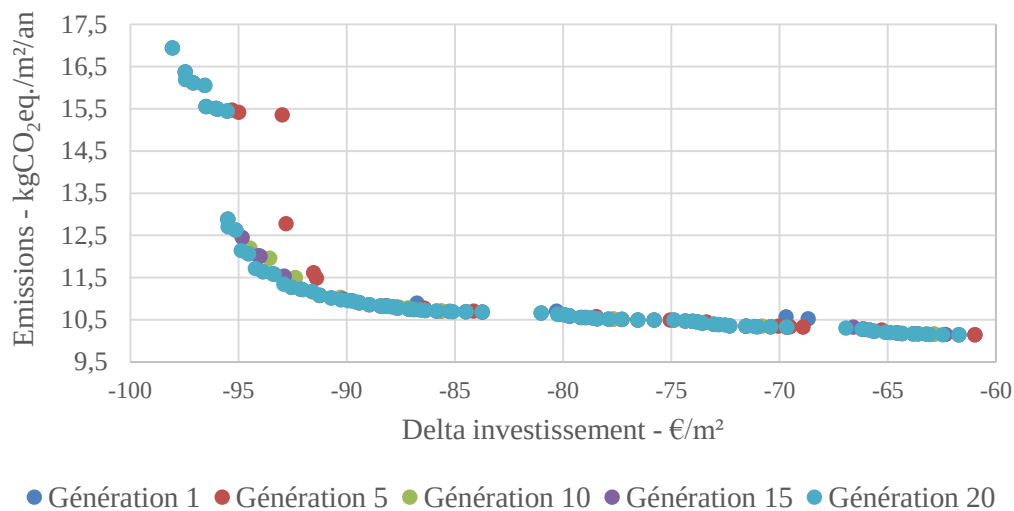


Figure 3-5 : Évolution du front de Pareto de l'optimisation monobâtiment du bâtiment de logements au cours des générations

L'optimisation du bâtiment de logements a été effectuée sur 20 générations ; une rapide étude réalisée au préalable montrait que le front optimal n'était pas atteint après 5 générations, et que le front de la dixième génération comportait trop peu de données. Les résultats semblent converger à partir de la quinzième génération, c'est donc le nombre de 20 générations qui a été défini comme critère d'arrêt afin d'augmenter la probabilité d'éviter les optimums locaux. Cette hypothèse est établie pour les deux bâtiments évalués, et sera confirmée par la suite lors de l'analyse de l'évolution des fronts de Pareto par le calcul de l'hypervolume.

Les solutions du front de Pareto de l'optimisation du bâtiment de bureaux Figure 3-6 présentent une faible variation concernant les émissions de gaz à effet de serre ; cela est dû au fait que le poste de consommation énergétique le plus important correspond à l'électricité spécifique, nécessaire à l'alimentation des ordinateurs de bureaux et à l'éclairage, et que les variables de décision n'ont pas d'influence sur cette consommation.

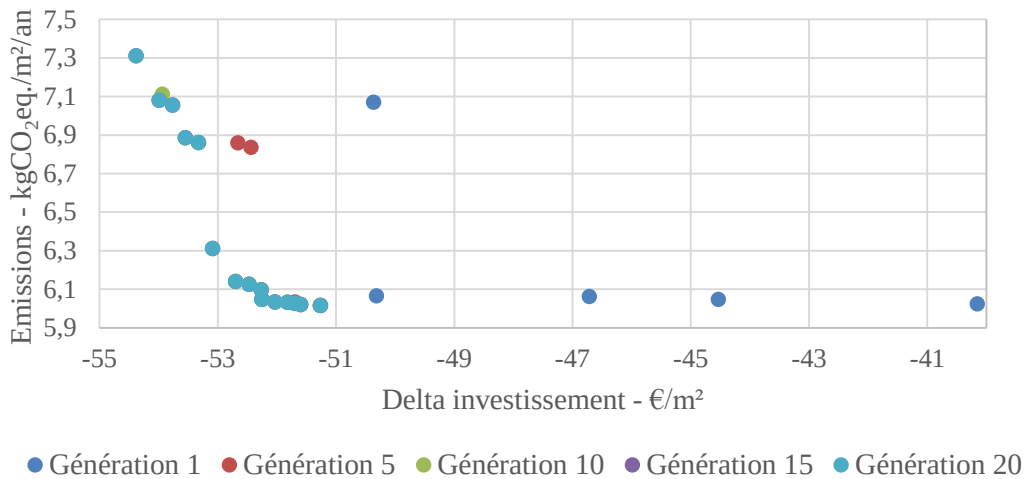


Figure 3-6 : Évolution du front de Pareto de l'optimisation monobâtiment du bâtiment de bureaux au cours des générations

L'optimisation a été effectuée en parallèle sur les deux bâtiments simultanément afin de comparer l'évolution des fronts ainsi que les résultats de ces deux procédures (monobâtiment et multibâtiment). L'évolution du front de Pareto au cours des 20 générations de l'optimisation multibâtiment est présentée à la Figure 3-7, les résultats sont présentés sous forme de moyenne pondérée selon la surface des bâtiments.

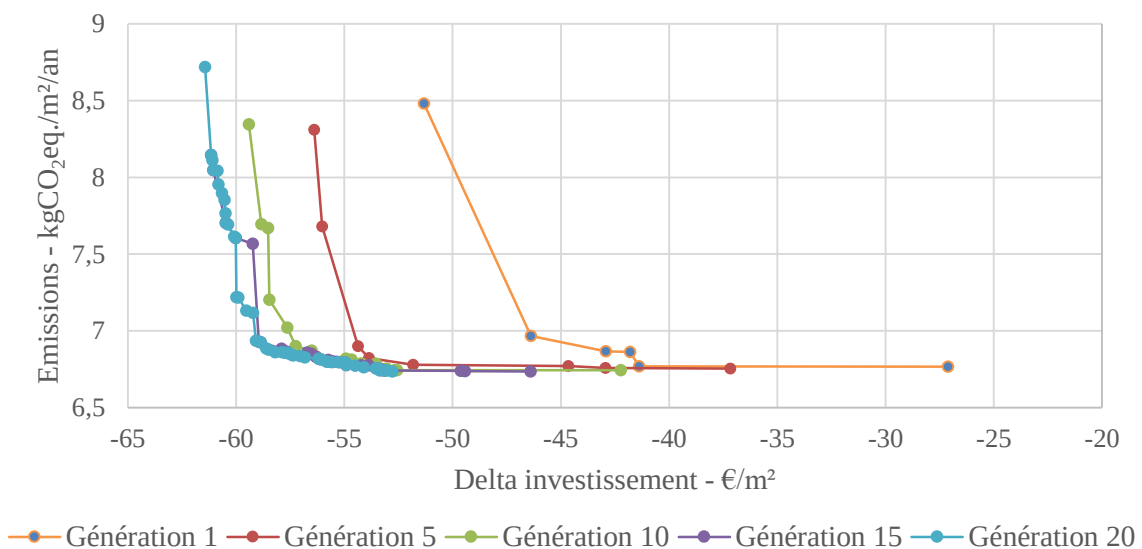


Figure 3-7 : Évolution du front de Pareto de l'optimisation multibâtiment au cours des générations

L'évolution des fronts de Pareto au cours des générations tend vers une potentielle convergence de l'algorithme vers le front de Pareto de la vingtième génération, en bleu Figure 3-7. Il a été montré dans les travaux de Recht (2016) que l'algorithme d'optimisation convergeait bien vers un front de Pareto optimal, ou théorique, obtenu avec plus de quatre millions de simulations pour une maison individuelle.

La convergence du front de Pareto au cours des générations est un résultat qualitatif, que nous pourrions confirmer avec le calcul de l'hypervolume qui est un paramètre quantitatif. Le choix du critère d'arrêt correspondant à 20 générations semble pertinent étant donné que le front évolue jusqu'à la quinzième génération puis commence à se stabiliser. Cette affirmation fera également l'objet d'une validation dans la suite de ce paragraphe.

La tendance de l'évolution du front de Pareto diffère selon la procédure choisie. Nous observons une plus grande différence entre les fronts de Pareto des différentes générations dans le cas de l'optimisation multibâtiment. Cela indique une convergence plus lente de l'algorithme optimisant simultanément les deux bâtiments.

3.1.3.2 Validation du critère d'arrêt

Nous proposons de confirmer les hypothèses concernant le critère d'arrêt en calculant l'hypervolume à chaque génération, avec un point de référence constant. Nous prendrons le point Nadir dont les coordonnées correspondent à la borne supérieure de chaque critère afin de répondre à notre problème de minimisation. L'évolution de l'hypervolume à chaque génération de l'optimisation multibâtiment est illustrée à la Figure 3-8, les valeurs sont normalisées pour une meilleure visibilité des résultats.

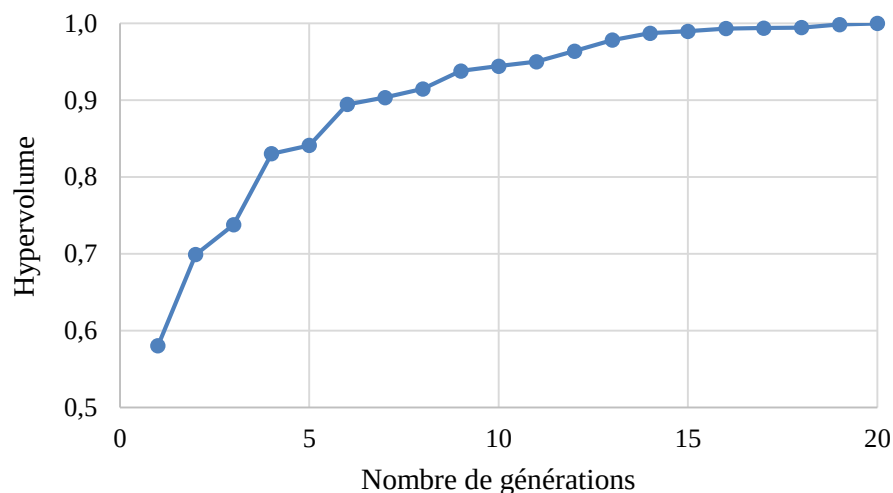


Figure 3-8 : Évolution de l'hypervolume normalisé au cours des 20 générations

L'hypervolume augmente notablement au cours des générations jusqu'à la quinzième génération, à partir de laquelle l'hypervolume se stabilise, son augmentation peut être considérée comme négligeable car elle ne dépasse pas 0,5 % d'une génération à l'autre. Les cinq dernières générations peuvent tout de même être utiles afin de vérifier la stabilité de l'hypervolume.

Afin de comparer la performance des deux méthodes d'optimisations étudiées, l'évolution des hypervolumes normalisés est tracée à la Figure 3-9. On constate alors que les deux optimisations monobâtiments convergent plus rapidement que l'optimisation simultanée.

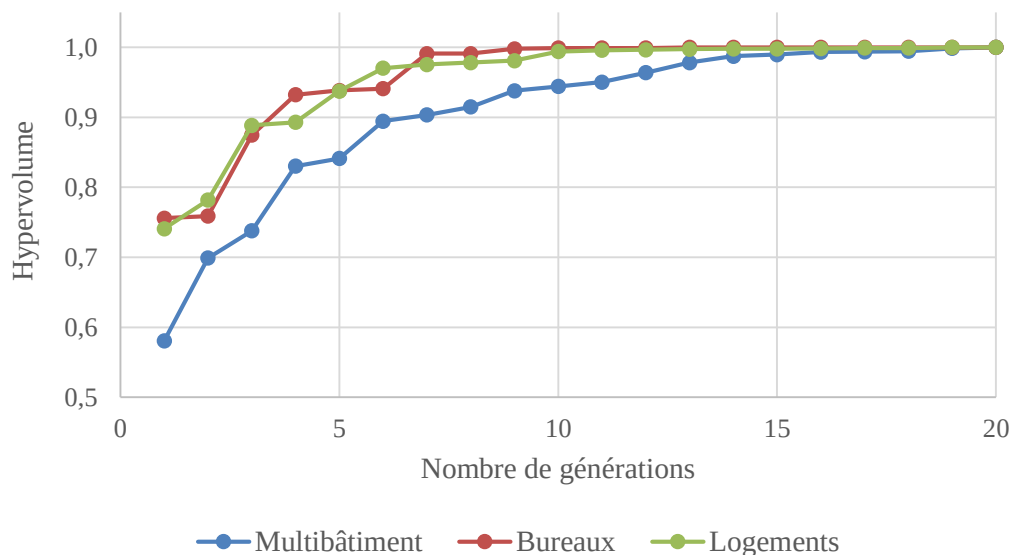


Figure 3-9 : Évolution de l'hypervolume de trois optimisations distinctes au cours des 20 générations

En conservant l'hypothèse faite précédemment sur l'augmentation de l'hypervolume supposée négligeable lorsqu'elle est inférieure à 0,5 % par rapport à la génération précédente, l'optimisation du bâtiment de bureaux atteint son front optimal dès la neuvième génération, et le bâtiment de logements à partir de la dixième génération. Il est ainsi possible d'arrêter les optimisations monobâtiment à partir de la quinzième génération, dans l'hypothèse où nous choisissons de vérifier la stabilité de l'hypervolume sur cinq générations. Le calcul de l'hypervolume a permis ici de remettre en question l'hypothèse faite à partir de l'évolution des fronts de Pareto, qui proposait d'effectuer 20 générations pour un seul bâtiment.

L'optimisation multibâtiment comprend 48 solutions uniques sur le front de Pareto, tandis que les optimisations des bâtiments de logements et de bureaux comprennent respectivement 88 et 15 solutions. Le faible nombre de solutions non dominées appartenant au front de Pareto optimal du bâtiment de bureaux est dû aux faibles besoins de chauffage et à l'importance de l'électricité spécifique que nous n'optimisons pas. Il serait possible d'intégrer une production d'électricité ou un calcul d'éclairage dans les paramètres d'optimisation afin de réduire cette consommation. Ce ne serait cependant pas une priorité, étant donnée la faible part de CO₂ équivalent en valeur absolue que cela représente.

3.1.3.3 Robustesse des méthodes

Dans le but de valider la robustesse de la méthodologie, nous avons effectué sept optimisations avec le même échantillonnage de population initiale. Nous présentons l'évolution de l'hypervolume normalisé de chacune de ces optimisations au cours des 20 générations à la Figure 3-10. Un même point de référence a été utilisé afin d'homogénéiser la valeur de l'hypervolume. Ce point est strictement supérieur à tous les points présents sur le dernier front de Pareto des sept optimisations étudiées ; il s'agit de la plus grande valeur d'émissions de GES et du coût d'investissement le plus élevé de l'ensemble des solutions des sept fronts de Pareto, augmentés d'une unité. La Figure 3-10 met en évidence le caractère aléatoire présent dans l'algorithme d'optimisation. Un caractère aléatoire apparaît également dans le processus de croisement, lors de la création des enfants à partir de la population de parents, comme on a pu le montrer en présentant le fonctionnement de l'algorithme.

Malgré le caractère aléatoire qui implique une évolution de l'algorithme différente d'une optimisation à l'autre, la Figure 3-10 montre la convergence de l'algorithme vers une valeur unique de l'hypervolume, ce qui conforte la robustesse de la procédure. Nous avons montré, en calculant l'hypervolume dans le paragraphe 3.1.3.2 de ce document, que l'optimisation simultanée des deux bâtiments de notre cas d'étude nécessitait au moins 15 générations pour arriver au front de Pareto optimal. Nous proposons d'effectuer la procédure sur 20 générations, dans notre cas d'étude, afin d'évaluer la robustesse de l'optimisation.

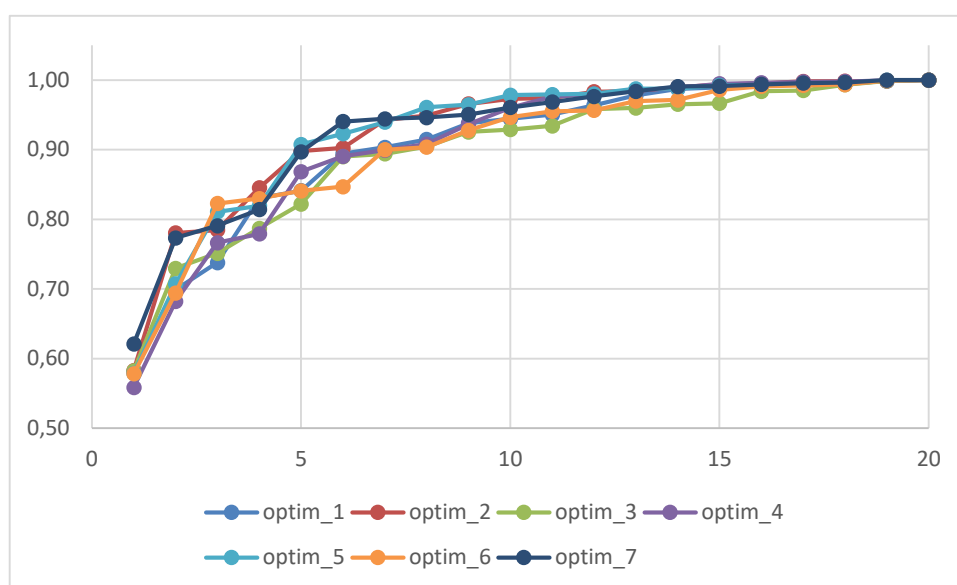


Figure 3-10 : Évolution de l'hypervolume des sept optimisations réalisées avec la même population initiale

3.1.3.4 Comparaison des résultats selon la procédure choisie

Afin de vérifier les résultats obtenus et de choisir la méthode la plus fonctionnelle, nous avons comparé les solutions optimales des deux optimisations de bâtiments, simultanées et séparées. Pour cela, nous nous référons d'une part au front de Pareto de la vingtième génération de l'optimisation multibâtiment, et d'autre part nous analysons les fronts de Pareto finaux des optimisations séparées. L'algorithme de l'optimisation multibâtiment opère sur la somme des émissions de GES et sur la somme du coût d'investissement des deux bâtiments. Par la suite, pour faciliter l'analyse avec des ordres de grandeur connus, nous divisons l'ensemble par la totalité de la surface (surface habitable pour les logements et surface utile pour les bureaux). Nous cherchons à connaître la différence des résultats entre les deux méthodes.

L'optimisation multicritère présentant des solutions optimales communes pour les deux bâtiments, le front de Pareto ne nécessite pas de traitement supplémentaire. Les optimisations monobâtiment quant à elles présentent le jeu de solution optimal pour les deux bâtiments séparés ; un post-traitement est nécessaire pour comparer les résultats séparés aux résultats communs de l'optimisation multibâtiment. La somme de l'ensemble des solutions présentes sur les fronts de Pareto du bâtiment de logements et du bâtiment de bureaux est faite afin que toutes les combinaisons soient étudiées. Le front de Pareto de cet ensemble est ensuite tracé.

Ce post-traitement nous permet d'obtenir les meilleures solutions que la procédure d'optimisation peut fournir, et de les comparer aux solutions du front de Pareto multibâtiment afin d'étudier cette dernière méthodologie. Les résultats sont présentés à la Figure 3-11. Toutes les solutions combinées des

Chapitre 3. Optimisation environnementale multicritère multibâtiment

deux optimisations monobâtiment y figurent en orange, et les solutions non dominées sont visibles en bleu. Un troisième jeu de données y est ajouté, présentant le front de Pareto de l'optimisation multibâtiment effectuée dans les mêmes conditions.

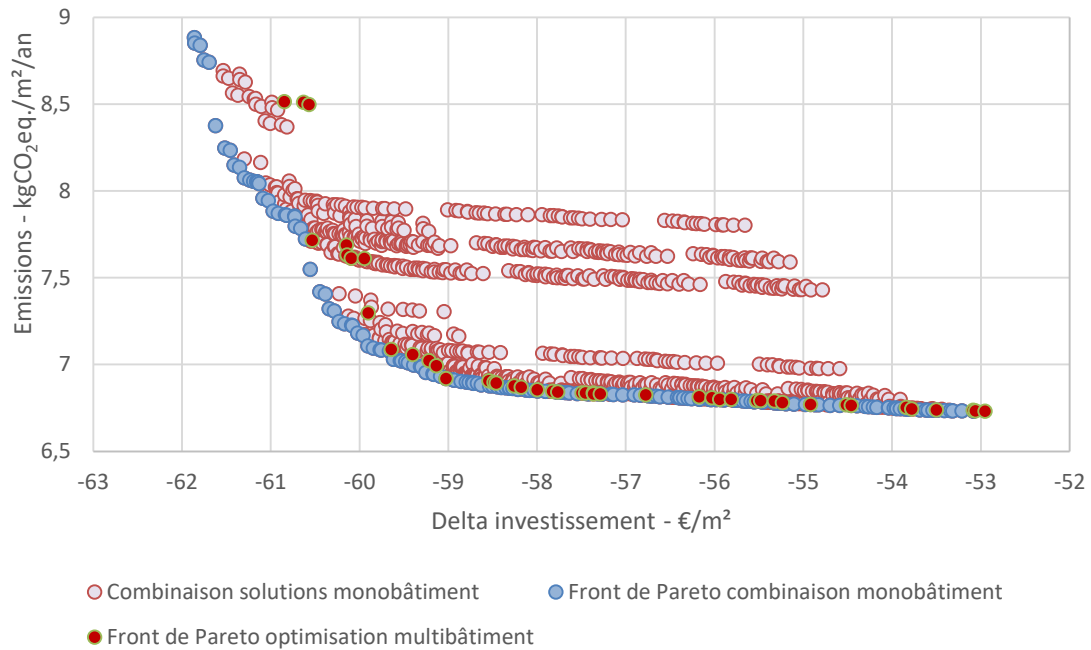


Figure 3-11 : Comparaison des résultats des optimisations multibâtiment et monobâtiment

On remarque que les fronts de Pareto multibâtiments, obtenus de deux manières différentes, se situent sur un ordre de grandeur commun, mais ne sont pas équivalents. La Figure 3-12 illustre cette différence plus clairement, en présentant uniquement les solutions non dominées des deux méthodes.

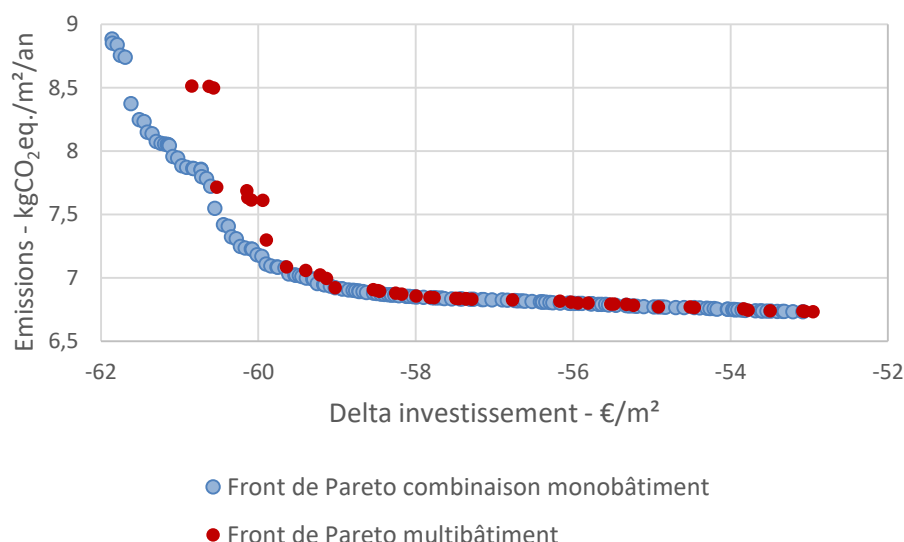


Figure 3-12 : Comparaison des solutions non dominées des deux méthodes d'optimisation

Les deux fronts de Pareto de la Figure 3-12 montrent la meilleure performance de l'optimisation lorsqu'elle est effectuée sur un unique bâtiment, certaines solutions optimales n'étant pas atteintes lors de l'optimisation simultanée des deux bâtiments. Cette affirmation concerne particulièrement le critère économique dans ce cas d'étude, les solutions à faibles émissions de GES sont présentes sur le front de Pareto obtenu avec les deux procédures, mais certaines solutions impliquant un faible coût d'investissement n'apparaissent pas sur le front multibâtiment, elles sont dominées par le front de Pareto monobâtiment.

3.1.3.5 Temps de calcul

Les temps de calcul des deux procédures d'optimisation sont également étudiés ; l'optimisation du bâtiment de logements dure en moyenne 1 heure et 05 minutes, et l'optimisation du bâtiment de bureaux dure environ 6h30. Ces temps de calcul sont directement liés à la simulation énergétique, de durée respective 6 et 31 secondes pour un bâtiment sur une année, qui est répétée 100 fois (nombre d'individus) au cours des 20 générations, soit 2000 simulations par bâtiment à chaque optimisation.

L'optimisation multibâtiment dure environ 7 heures et 30 minutes. Ainsi, les temps de calcul, bien qu'ils puissent varier légèrement d'une optimisation à l'autre, sont similaires. Le lien direct avec la simulation énergétique nous permettait d'anticiper ce résultat, mais il nécessitait d'être vérifié.

Le temps de calcul est ainsi dépendant du nombre d'individus et du nombre de générations. Nous ne remettons pas en question le nombre d'individus qui provient d'une étude bibliographique et d'une étude rapide de comparaison des solutions sur le front de Pareto optimal du cas d'étude. L'intérêt de fixer le critère d'arrêt au bout de 20 générations a également été démontré, cependant il serait utile de

reconfirmer cette hypothèse lors d'un changement important du cas d'étude. Fixer le critère d'arrêt à 15 générations permettrait un gain de temps de près de 2 heures dans notre cas.

3.1.3.6 Paramétrage de l'algorithme

La performance d'un algorithme dépend en partie de son paramétrage. Une étude a alors été réalisée afin de maximiser la performance des optimisations effectuées, en évaluant l'influence des taux de croisement et de mutation, initialement fixés respectivement à 0,8 et 0,15.

Différents taux de croisements ont tout d'abord été comparés, prenant les valeurs de 0,1 à 0,9 avec un pas de 0,1. Pour cela, neuf optimisations du bâtiment de logements L1 implémentant ces taux de croisement ont été réalisées, avec l'objectif commun de minimiser les émissions de GES et le coût d'investissement du bâtiment. La performance est évaluée à travers l'évolution de l'hypervolume au cours des générations, illustrée à la Figure 3-13, la probabilité de croisement étant notée CXPB. Le même point de référence a été appliqué, il s'agit des coordonnées maximales de l'ensemble des solutions des neuf fronts de Pareto, d'une part pour le critère du changement climatique, d'autre part pour le critère économique. Ainsi, le point de référence est dominé par l'ensemble des solutions de tous les fronts de Pareto finaux des optimisations effectuées.

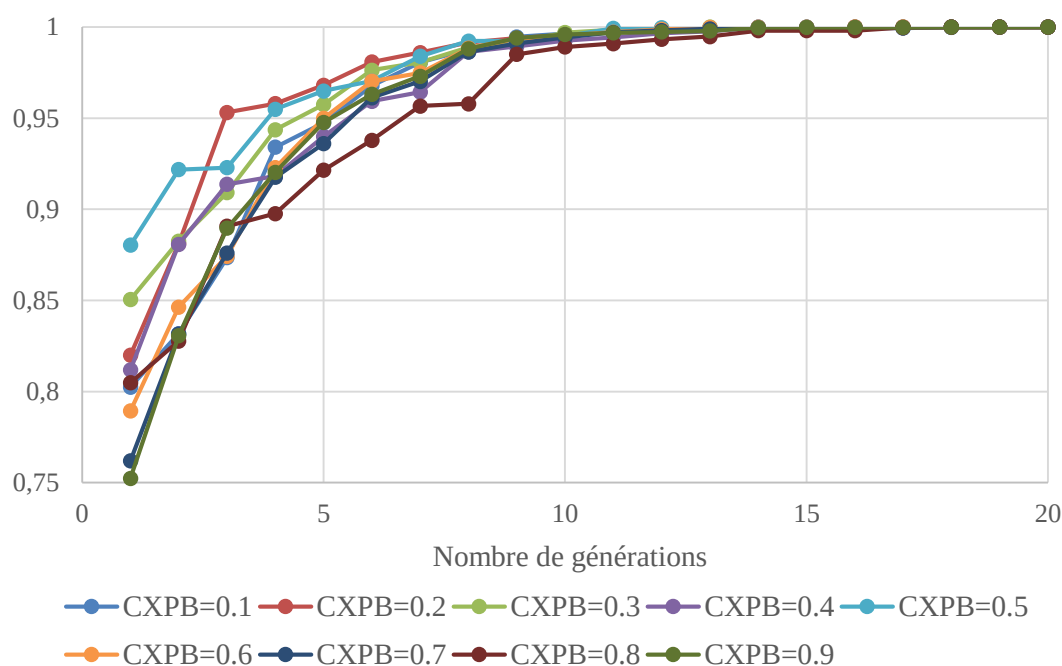


Figure 3-13 : Évolution de l'hypervolume en fonction du taux de croisement au cours des générations

Les résultats montrent que le taux de croisement a une influence sur la performance de l'algorithme au cours des premières générations. Dans ce cas l'hypervolume final est atteint pour l'ensemble des fronts à partir de la quatorzième génération, le taux de croisement n'a donc pas d'influence sur le résultat

final. Cependant, le taux initial étant fixé à 0,8, nous remarquons qu'il s'agit de la moins bonne performance entre les différents paramétrages comparés ; les autres fronts atteignent la valeur finale de l'hypervolume, soit la convergence des solutions, dès la onzième génération. Le taux de croisement préconisé par la littérature étant un taux élevé, nous faisons le choix de modifier le paramètre en fixant un taux de croisement de 0,9 pour la suite de cette thèse. Cette étude semble montrer un potentiel pour des faibles valeurs de taux de croisement, cela pourrait faire l'objet d'une étude approfondie afin de définir le paramétrage optimal en considérant l'ensemble des paramètres ; cela nécessiterait également une répétition des optimisations afin de s'assurer de la robustesse des résultats.

La pertinence du taux de mutation est ensuite évaluée. La minimisation des émissions de GES et du coût d'investissement est réalisée plusieurs fois en faisant varier le taux de mutation. Ce taux prend la valeur de 0,02, 0,05, 0,1 et 0,15. Un cinquième taux de mutation adaptatif est introduit ; ce taux varie au cours des générations, il est égal à 0,15 pour la première génération puis décroît progressivement jusqu'à atteindre la valeur de 0,02 à la vingtième génération. La valeur de l'hypervolume normalisé au cours des générations est représentée à la Figure 3-14 pour l'ensemble des optimisations dont le taux de mutation a été décrit.

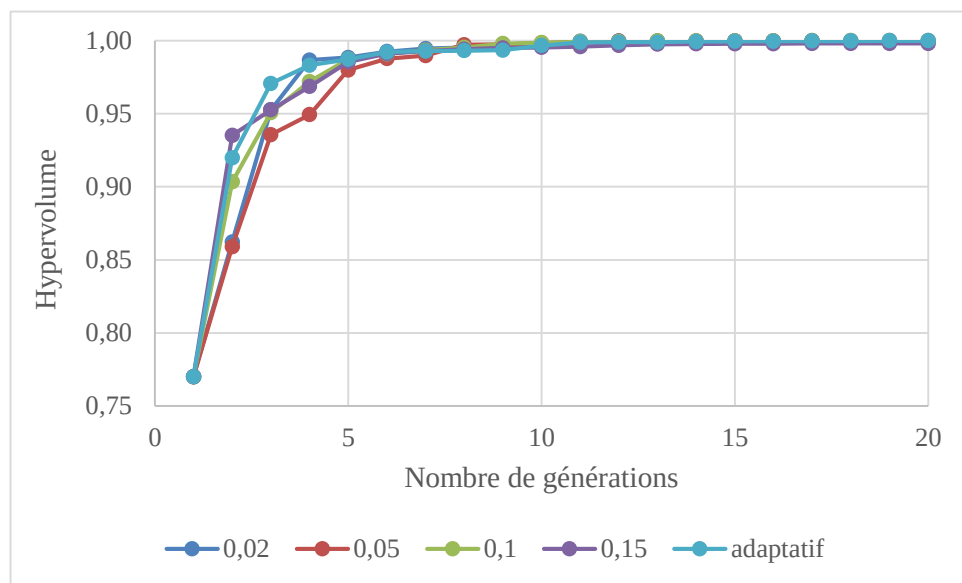


Figure 3-14 : Évolution de l'hypervolume en fonction du taux de mutation au cours des générations

Les résultats montrent qu'un hypervolume commun est atteint rapidement pour l'ensemble des cas, à partir de la 8^e génération, et même à partir de la 5^e génération excepté pour le taux de mutation de 0,05. On peut supposer une convergence légèrement plus rapide avec le taux de mutation adaptatif mais il faudrait poursuivre cette étude pour confirmer cette hypothèse. Nous pouvons tout de même conclure que le taux de mutation initialement implémenté, égal à 0,15, correspond à une très bonne performance de l'algorithme lorsque le taux de croisement est de 0,9. Nous conserverons donc la valeur de 0,15 pour ce paramètre d'optimisation au cours de cette thèse. On a montré précédemment une grande variabilité

entre les optimisations, la méthode de définition du paramétrage nécessite d'être poursuivie afin de déterminer les taux de croisement et de mutation optimaux. Cependant, ce plan de paramétrage permet de présenter une première approche, et assure un fonctionnement optimal de l'algorithme dans cette étude de cas, car le paramétrage n'influence pas les résultats à partir de la 15^e génération. L'approfondissement de ce plan de paramétrage permettrait de réduire les temps de calcul si le critère d'arrêt était également modifié, car le paramétrage optimal accélère la convergence de l'algorithme.

3.1.3.7 Conclusion

Nous avons présenté dans cette section le fonctionnement de l'algorithme et démontré sa convergence, sa robustesse et proposé une méthode pour déterminer son paramétrage optimal. Nous arrivons à la conclusion que la procédure à privilégier dans le cas d'une optimisation multicritère environnementale à l'échelle multibâtiment est une optimisation bâtiment par bâtiment suivie d'un post-traitement pour agréger les résultats. Cette méthode est plus performante en terme de qualité de résultats et permet un plus grand degré de liberté car elle met à disposition les résultats à l'échelle du bâtiment en plus des solutions optimales à l'échelle du quartier. L'optimisation monobâtiment prend en compte les masques que représentent les autres bâtiments du quartier et qui diminuent les apports solaires, il revient à l'utilisateur de l'outil de les intégrer au fichier d'entrée provenant de Pleiades.

La première partie de ce travail portant sur la détermination de la procédure d'optimisation la plus adaptée, nous proposons désormais une application de cette méthodologie à un bâtiment de ce cas d'étude, selon différents critères environnementaux.

3.2 Application de la méthode à un bâtiment de logements

Les développements présentés dans la partie précédente permettent d'optimiser l'enveloppe d'un ou de plusieurs bâtiments de manière fiable et rapide. Cette deuxième partie consiste à appliquer l'optimisation multicritère au bâtiment de logements L1 afin de montrer l'intérêt de la procédure à travers les résultats obtenus. L'agrégation des résultats pour obtenir les résultats d'optimisation des bâtiments à l'échelle du quartier se faisant en post-traitement, l'application de la méthode à un seul bâtiment est cohérente et suffisante pour montrer le fonctionnement et les résultats de la méthode appliquée à un cas d'étude. L'optimisation environnementale est réalisée sur deux critères, l'un étant économique et l'autre environnemental, pour les sept indicateurs environnementaux présentés au chapitre 2. Ces choix sont faits pour plusieurs raisons :

- Simplifier la présentation des résultats sur un front de Pareto à deux dimensions pour proposer une aide à la décision rapide et facile d'accès sans étape supplémentaire d'interprétation des résultats.

- Le critère économique est actuellement un frein considérable à l'élaboration des projets responsables, l'objectif est de montrer aux décideurs qu'il est possible d'améliorer l'impact environnemental d'un projet en restant dans le budget alloué. La présentation du front de Pareto a alors un aspect pédagogique ; le décideur visualise les gains environnementaux qui peuvent être obtenus en augmentant légèrement le budget, ou au contraire l'intérêt qu'il pourrait avoir à diminuer le coût d'investissement d'un bâtiment pour un impact environnemental similaire, et ainsi attribuer le budget restant à un autre bâtiment ou à une autre décision plus influente sur les résultats.

L'espace de décision comprend différentes épaisseurs d'isolant compris dans les murs extérieurs, la toiture et le plancher bas, ainsi que différentes tailles et types de fenêtres. Les caractéristiques sont répertoriées dans le Tableau 3-2 et dans le Tableau 3-3.

Cette optimisation comprend 11 gènes, dont sept sont discrets et huit sont catégoriels, ils sont rappelés dans la liste suivante :

- épaisseur de la laine de verre comprise dans les murs extérieurs ;
- épaisseur du polystyrène expansé compris dans le plancher bas ;
- épaisseur du polyuréthane compris dans la toiture ;
- taille des fenêtres de la paroi sud du bâtiment ;
- taille des fenêtres de la paroi ouest du bâtiment ;
- taille des fenêtres de la paroi nord du bâtiment ;
- taille des fenêtres de la paroi est du bâtiment ;
- type de fenêtre de la paroi sud du bâtiment ;
- type de fenêtre de la paroi ouest du bâtiment ;
- type de fenêtre de la paroi nord du bâtiment ;
- type de fenêtre de la paroi est du bâtiment.

L'optimisation est effectuée avec 100 individus et sur 20 générations, le taux de croisement est 0,9 et le taux de mutation 0,15. Enfin, le chauffage et l'eau chaude sanitaire proviennent du réseau de chaleur auxquels sont raccordés tous les bâtiments du quartier. La répartition de production de chaleur entre la chaudière bois et la chaudière gaz est considérée constante au cours du temps, les impacts environnementaux associés le sont également.

3.2.1 Indicateurs ACV

Comme indiqué dans le deuxième chapitre, les indicateurs environnementaux sélectionnés dans cette thèse proviennent de catégories différentes ; les indicateurs de niveau endpoint et de niveau

Chapitre 3. Optimisation environnementale multicritère multibâtiment

midpoint sont des indicateurs ACV, tandis que les autres sont des indicateurs de flux. Dans un premier temps les indicateurs ACV sont évalués.

Les développements informatiques présentés en première partie de ce chapitre, ainsi que la première application de l'optimisation multicritère portent sur l'indicateur de changement climatique. Ce choix est fait compte tenu des enjeux climatiques actuels ; l'Accord de Paris a pour objectif de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète en-dessous de 2°C par rapport aux niveaux pré-industriels. La réduction des émissions de gaz à effet de serre est devenu un défi commun à relever, par les élus, les acteurs économiques et les citoyens. De plus, le changement climatique implique des phénomènes visibles à l'échelle planétaire, l'ensemble de la population étant concernée, on observe une volonté de changement de la part des différents secteurs, en plus de l'apparition de normes environnementales imposant des seuils concernant cet indicateur. Certains phénomènes sont cités ci-dessous :

- l'augmentation de la température moyenne, notamment l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur ;
- la montée des eaux impliquant des déplacements de population suite à l'inondation de certaines zones côtières, voire de la disparition totale de pays insulaires ;
- des crises liées aux ressources alimentaires limitées ;
- le déséquilibre de la biodiversité impliquant l'extinction de certaines espèces animales ou végétales, des conséquences importantes sur les implantations humaines ainsi que des dangers sanitaires comme la propagation importante de maladies animales susceptibles d'être dangereuses pour l'Homme.

L'indicateur du changement climatique est donc l'indicateur environnemental le plus connu du grand public, pour lequel des références ont été établies, ce qui permet aux décideurs de le prendre en compte lors des décisions, mais aussi d'obtenir les financements nécessaires en respectant les objectifs de réduction des gaz à effet de serre.

3.2.1.1 Changement climatique

L'optimisation a pour objectif de minimiser les impacts relatifs au changement climatique ainsi que le coût d'investissement du bâtiment. La performance environnementale et économique des solutions est évaluée à chaque génération par les moteurs de calcul COMFIE et EQUER, afin de converger vers la meilleure population d'individus, composée uniquement de solutions non dominées : ces solutions décrivent le front de Pareto optimal.

La production d'un TJ par la chaudière bois du réseau de chaleur est responsable de l'émission de 4349 kgCO₂eq, tandis qu'un TJ produit par la chaudière gaz de ce RCU est responsable de l'émission de 69873 kgCO₂eq. Ainsi, le RCU émet 0,1336 kgCO₂eq par kWh d'énergie produite ; l'étape

d'utilisation du bâtiment L1 étudié est alors responsable de la majorité des impacts sur le changement climatique.

L'optimisation ayant été programmée avec 100 individus et sur 20 générations, le nombre total d'évaluations s'élève à 2000, elles sont présentées en bleu à la Figure 3-15. Les meilleures solutions au sens de Pareto sont les solutions non-dominées, elles font partie du front de Pareto de la vingtième et dernière génération, visibles en orange sur le graphique. Enfin, la performance du bâtiment initial est mise en évidence par le point rouge de la Figure 3-15.

Bien que l'optimisation soit effectuée sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, les impacts de l'étape d'utilisation sont majoritaires, et l'impact sur le changement climatique est directement corrélé aux besoins de chauffage. Ainsi, l'absence de solutions émettant entre 13 et 15 kgCO₂eq./m²/an s'explique par une absence de solutions dont les besoins de chauffage sont compris entre 26 et 45 kWh/m²/an. En effet, l'épaisseur d'isolant minimale contenue dans l'espace de décision est 1 cm, et l'allèle suivant prend la valeur de 7 cm, or les besoins de chauffage diminuent fortement dès les premiers centimètres d'isolation. Ainsi, le « saut » de besoins de chauffage correspond au changement de l'épaisseur d'isolant dans les murs extérieurs, qui est de 1 cm pour les solutions dont les besoins de chauffage sont supérieurs à 46 kWh/m²/an, et de 7 cm pour les solutions correspondant à la borne inférieure du saut visible sur la Figure 3-16. De plus, les murs extérieurs correspondent à 66 % de la surface déperditivité du bâtiment de base, et 76 % de la surface déperditivité des variantes de bâtiments appartenant au front de Pareto, leur surface de vitrages étant inférieure à celle du cas de base. Dans ce cas d'étude correspondant à un immeuble de 15 étages, l'isolation des façades a bien plus d'influence que l'isolation du plancher et de la toiture.

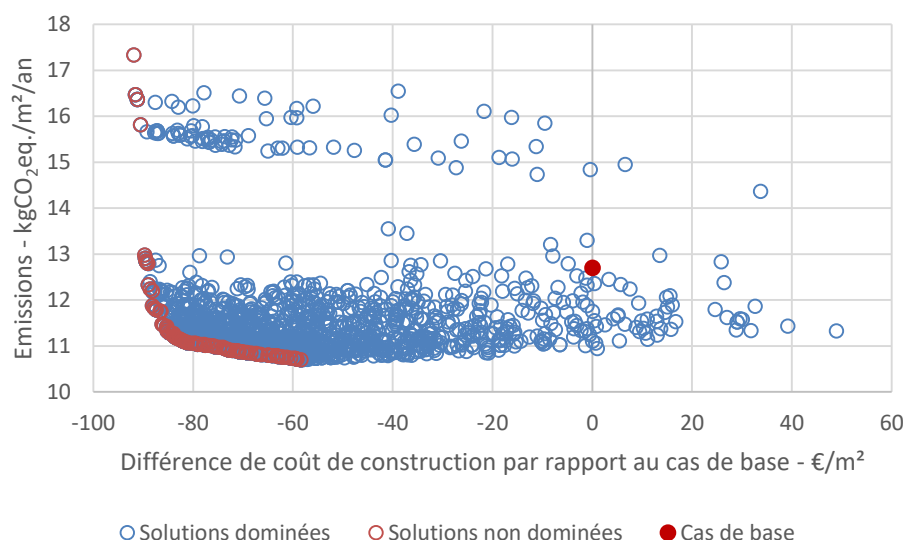


Figure 3-15 : Solutions de l'optimisation du bâtiment L1

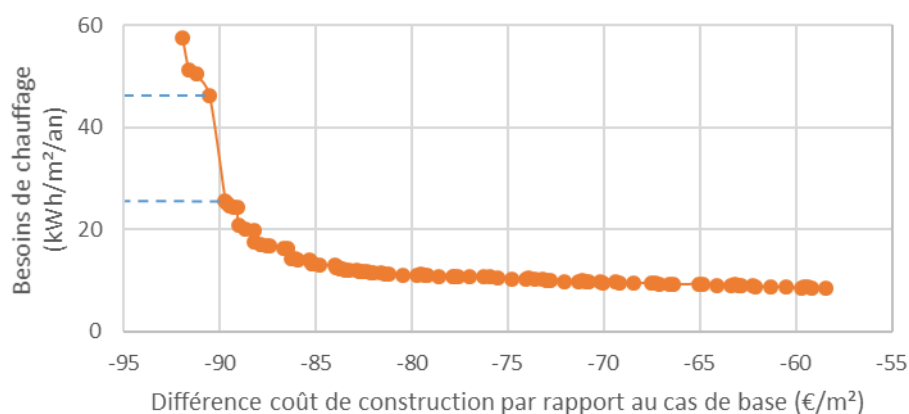


Figure 3-16 : Besoins de chauffage du bâtiment L1 correspondant aux solutions du front de Pareto

Le front de Pareto de l'optimisation, dont les solutions sont visibles en orange Figure 3-15, est également présenté à la Figure 3-17. Les solutions à faible coût permettent de réduire le coût d'investissement de 92 €/m² par rapport à la variante de base, et émettent 17,5 kgCO₂eq./m²/an. D'autre part, les solutions les plus chères permettent tout de même de réduire le coût d'investissement de 58 €/m² et engendrent l'émission de près de 11 kgCO₂eq./m²/an, soit une réduction de 13 % par rapport au cas de base. Ce dernier n'apparaît pas dans les solutions de cette optimisation, qui a permis de réduire tant les émissions de gaz à effet de serre que le coût d'investissement. Ces résultats illustrent l'intérêt de la méthode d'optimisation ; on observe une forte variation d'émissions de GES entre les solutions à faible coût ; une augmentation de 2 % du coût d'investissement de la solution la moins chère permet de réduire de 45 % les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, le front de Pareto n'étant pas linéaire, une augmentation considérable du coût n'aura pas un effet proportionnel sur le changement climatique. L'étape d'utilisation étant l'étape la plus émettrice en GES, les solutions non dominées sont corrélées

avec les besoins de chauffage, dont la valeur minimale est de 9 kWh/m²/an dans cet espace de recherche. Ce dernier pourrait être étendu à des épaisseurs d'isolant plus importantes afin d'abaisser la limite inférieure des besoins de chauffage. Cependant, bien qu'une enveloppe très performante permettrait de diminuer considérablement les besoins de chauffage et les impacts associés, d'autres postes d'utilisation ne sont pas optimisés, comme la quantité d'eau chaude sanitaire utilisée par les habitants, poste émetteur en GES du fait que l'eau est chauffée par le réseau de chaleur, alimenté presque pour moitié en gaz. Les émissions de GES n'approcheraient pas la valeur de zéro sans production d'énergie renouvelable. Des technologies telles que le solaire thermique pour la production d'eau chaude permettraient de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais elles ne font pas l'objet de cette thèse.

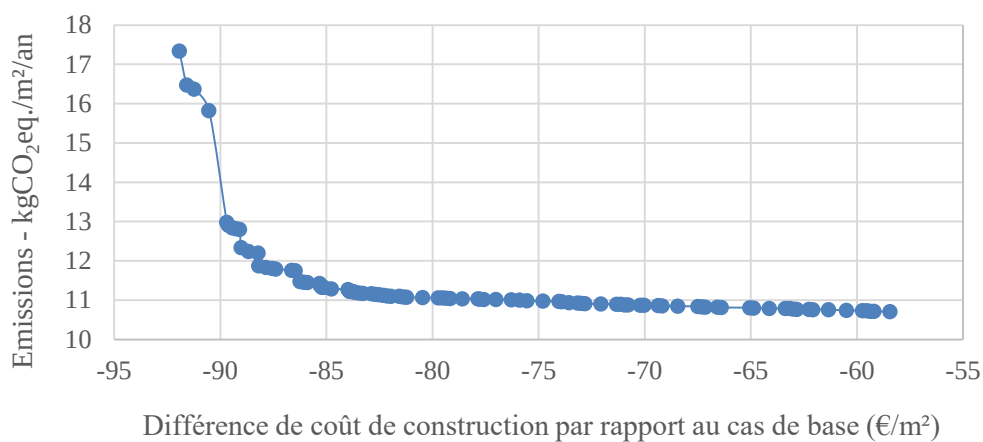


Figure 3-17 : Front de Pareto optimal du bâtiment L1

Le front de Pareto Figure 3-17 contient l'ensemble des solutions non dominées obtenues à la vingtième génération de l'optimisation. Afin de prouver que ce front correspond au front de Pareto optimal, on démontre la convergence de l'algorithme de deux manières différentes ; l'une est qualitative, l'autre quantitative. Dans le premier cas, on s'intéresse aux solutions non dominées des différentes générations, et on cherche à montrer que les solutions n'évoluent plus d'une génération à l'autre ; on trace alors l'évolution des fronts de Pareto au cours des générations avec un pas de 5 générations à la Figure 3-18. On constate une évolution au cours des générations, les solutions non dominées des premières générations comprennent un écart avec le cas de base en terme de coût qui correspond à la répartition des solutions sur l'ensemble de l'espace de décision lors de l'initialisation de la population par séquence de Sobol. La première et la cinquième génération comprennent très peu de solutions, respectivement 3 et 5, les fronts sont alors très mal définis, on constate une amélioration de la définition du front à partir de la génération 10. Au cours des générations, les fronts de Pareto comprennent des individus dont les impacts sur le changement climatique et le coût d'investissement diminuent. L'évolution est notable jusqu'à la quinzième génération, à partir de laquelle les solutions semblent se

confondre avec les solutions non dominées de la vingtième génération. On peut donc supposer que la convergence est atteinte.

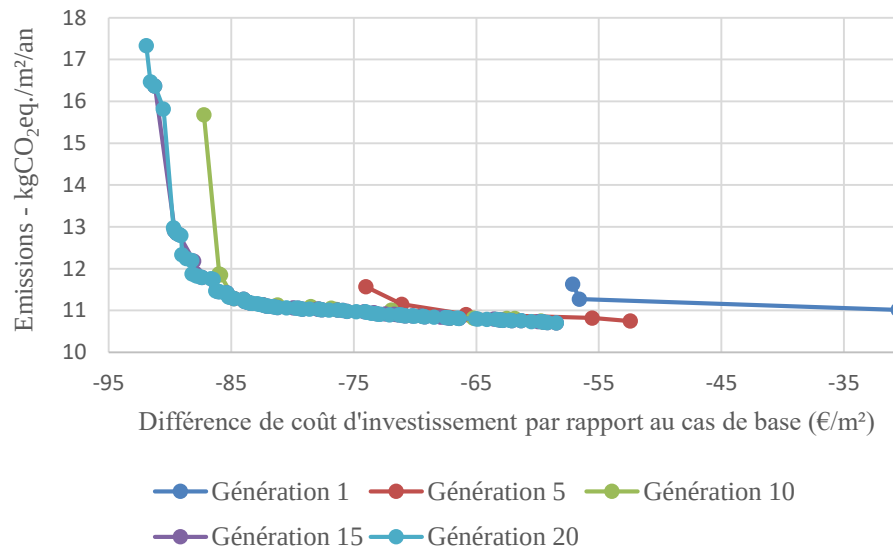


Figure 3-18 : Évolution des fronts de Pareto au cours des générations

Une seconde approche quantitative est réalisée afin de vérifier la première conclusion de convergence, basée sur la visualisation graphique. L'objectif de cette étude est de connaître l'évolution de l'hypervolume au cours des générations, afin de conclure sur la vitesse de convergence de l'optimisation en fonction de la stabilisation de l'hypervolume. Tout d'abord, le point de référence nécessaire au calcul de l'hypervolume est déterminé. Le calcul de l'hypervolume à partir du point Nadir n'est pas nécessaire, le point de référence nécessite seulement d'être dominé par toutes les solutions des différents fronts de Pareto. Pour s'assurer de la domination du point de référence, on choisit les coordonnées maximales de l'ensemble des solutions évaluées au cours de l'optimisation. Ce point fictif est représenté à la Figure 3-19, il s'agit d'une variante 49 €/m² plus chère que la variante de base, et émettant plus de 17 kgCO₂eq./m²/an. Il ne s'agit pas du point Nadir, qui correspond au maximum que l'espace de décision permet d'atteindre, sur chacun des deux critères. La variante représentée en rouge sur la Figure 3-19 est bien la solution la moins chère de l'espace de décision, elle appartient au front de Pareto final ; mais la variante évaluée la plus chère n'est pas la variante émettant le moins de GES. D'une part, la variante la plus chère de l'espace de décision concilie la surface maximale d'ouvertures par rapport aux parois opaques avec du triple vitrage, ce qui ne correspond pas au minimum des besoins de chauffage, augmentés par une grande surface de fenêtres. D'autre part, cette variante n'étant pas encouragée dans l'optimisation car elle ne correspond ni au critère de minimisation des émissions de GES, ni à la minimisation du coût d'investissement, elle ne fait pas partie des 2000 solutions évaluées. L'absence de cet individu dans l'ensemble des solutions évaluées contribue néanmoins à montrer la performance de l'algorithme qui évince rapidement les individus ne correspondant pas au problème

d'optimisation. Les deux solutions contribuant au point de référence déterminé, la plus chère et la moins chère, sont décrites dans le Tableau 3-4. Le coût indiqué dans ce tableau correspond à la différence de coût d'investissement par rapport au cas de base.

Tableau 3-4 : Caractéristiques des variantes contribuant au point de référence de l'hypervolume

Coût (€/m²)	Épaisseur d'isolant (cm)			Ouvertures selon orientation de la façade (%)				Type de vitrage selon orientation de la façade			
	Murs ext.	Plancher bas	Toit	Sud	Ouest	Nord	Est	Sud	Ouest	Est	Nord
- 92	1	1	1	20	20	20	20	Double	Double	Double	Double
+49	30	30	25	50	35	20	45	Double	Triple	Triple	Double

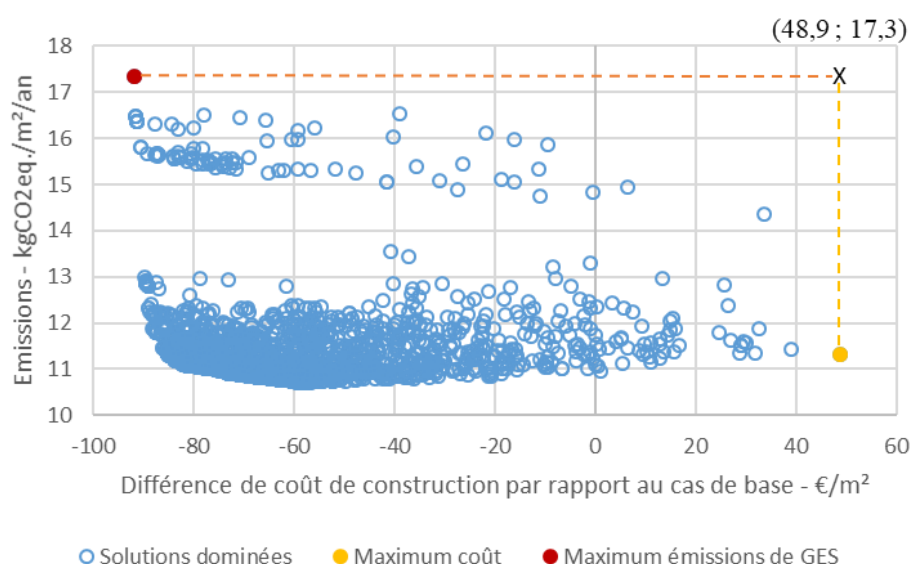


Figure 3-19 : Point de référence défini à partir des coordonnées maximales des solutions évaluées

L'hypervolume est calculé à chaque génération en fonction du point de référence défini précédemment. Son évolution au cours des générations est présentée à la Figure 3-20 ; les valeurs sont normalisées pour une meilleure lisibilité des résultats. Par définition, lors d'un problème de minimisation des objectifs, l'hypervolume augmente au cours des générations et se stabilise lorsque les solutions ne varient plus d'une génération à l'autre, ce qui traduit la convergence vers une population d'individus. On observe une stabilisation à partir de la onzième génération environ. On propose alors une approche scientifique quantitative pour déterminer la génération à partir de laquelle l'algorithme a convergé ; il s'agit de définir un seuil maximal d'évolution de l'hypervolume d'une génération à la suivante. Si ce seuil n'est pas dépassé pendant un certain nombre de générations consécutives, par exemple cinq générations, alors on considère que l'algorithme a convergé.

Chapitre 3. Optimisation environnementale multicritère multibâtiment

Dans le cas de la minimisation des émissions de GES et du coût d'investissement du bâtiment L1, l'évolution de l'hypervolume entre deux générations consécutives est inférieure à 1 % à partir de la 11^{ème} génération ; ainsi la convergence peut être établie à la 16^{ème} génération si nous conservons l'hypothèse faite en première partie de ce chapitre concernant la nécessité de vérifier la stabilité de l'hypervolume au cours de 5 générations. Cependant, si le seuil est fixé à 0,5 % d'évolution, alors il n'est atteint qu'à partir de la 15^{ème} génération, ce qui impliquerait une convergence estimée à la vingtième génération. Le choix du nombre de générations consécutives au cours duquel le seuil ne doit pas être dépassé est arbitraire, il peut être diminué pour réduire les temps de calcul. Cependant, il est nécessaire de s'assurer de la véritable stabilisation de l'hypervolume avant de réduire le nombre de générations, qui correspond dans ce cas, au critère d'arrêt de l'optimisation. Nous pouvons ainsi conclure quant à la convergence de l'algorithme ; les solutions non dominées de l'optimisation sont approchées dès la 11^e génération, et la population optimale résultant de l'optimisation est obtenue à partir de la 15^e génération, la vérification ayant été effectuée sur les 5 générations suivantes.

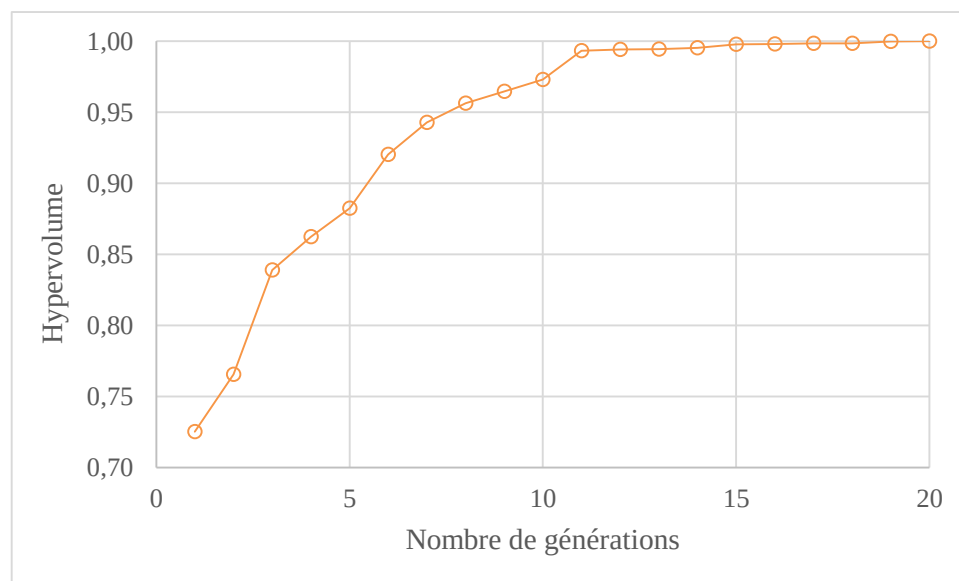


Figure 3-20 : Évolution de l'hypervolume au cours des générations

Une fois la convergence du front démontrée, nous nous intéressons aux caractéristiques des solutions. Une tendance est observée concernant les solutions du front ; les solutions les moins chères (et les plus émettrices en GES) contiennent très peu d'isolant et des fenêtres double vitrage, tandis que les solutions les plus chères contiennent du triple vitrage, et globalement plus d'isolant. L'ensemble des individus de ce front de Pareto est composé de la surface minimale de vitrage soit 20 % d'ouvertures par rapport aux parois opaques, car les fenêtres sont chères à l'installation et ne diminuent pas forcément les besoins de chauffage, du moins elles ne réduisent pas suffisamment les émissions de GES pour appartenir aux solutions non dominées de cette optimisation. Comme indiqué précédemment, les murs

extérieurs représentent 76 % de la surface déperditive de ce bâtiment de 15 étages pour une surface d'ouverture correspondant à 20 % de la surface de parois opaques. Afin de faciliter la lecture des résultats, on présentera uniquement l'épaisseur d'isolant au sein des murs extérieurs. Les solutions du front de Pareto ont été classées à la Figure 3-21 de la solution la moins chère à la solution responsable de la plus faible émission de GES, qui est également la solution la plus chère du front. On observe une augmentation par palier de l'épaisseur de l'isolation des murs, qui correspond à la discrétisation imposée par l'espace de décision, et le type des fenêtres installées sur les façades du bâtiment, en fonction de leur orientation. Les solutions les moins chères contiennent du double vitrage, et les solutions les moins émettrices de GES sont composées de triple vitrage. Il existe un seuil à partir duquel les fenêtres placées sur la façade nord (en orange) ne sont plus composées de double vitrage, mais de triple vitrage, il se situe environ à la moitié des solutions du front. Ce changement de type de vitrage est dû au faible apport solaire provenant des fenêtres placées au nord, ainsi une grande partie des solutions contient du triple vitrage ce qui permet de limiter les besoins de chauffage. On observe le même phénomène sur les fenêtres placées au sud (en violet), cependant le seuil est atteint plus tardivement, car le double vitrage au sud permet également de diminuer les besoins de chauffage, dans une certaine mesure. Enfin, le type des fenêtres des parois est et ouest (traits pointillés bleu et vert) ne présente pas d'homogénéité, cela traduit la difficulté de l'obtention du compromis économique et environnemental entre l'épaisseur d'isolant du plancher, de la toiture et le type de fenêtres à privilégier.

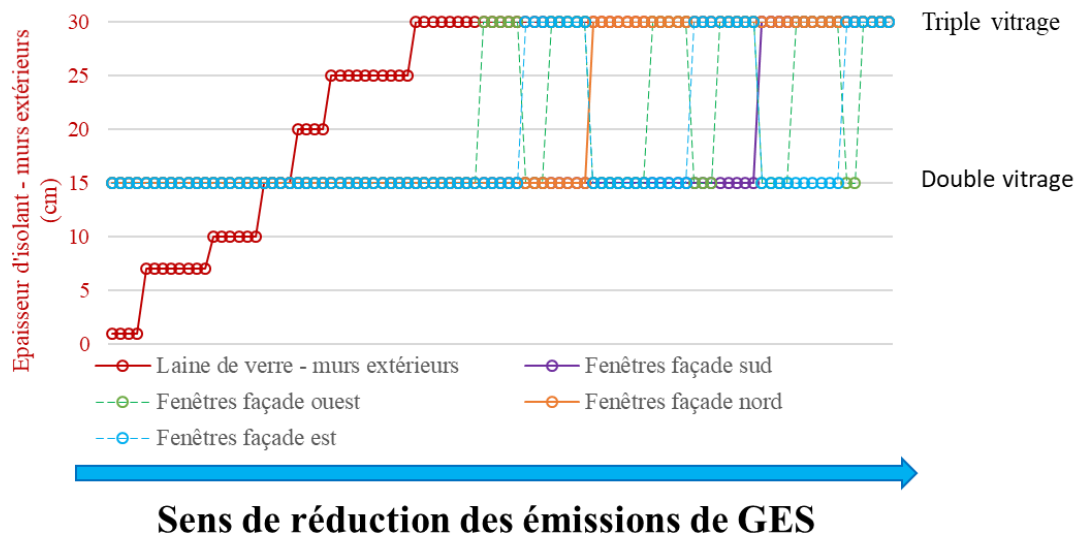


Figure 3-21 : Ordre des choix les plus efficaces à mettre en œuvre pour tendre vers une réduction des émissions de GES

3.2.1.2 Indicateurs orientés dommages

La performance environnementale d'un bâtiment ne se limite pas à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais s'établit selon l'ensemble des indicateurs environnementaux affectés par le

Chapitre 3. Optimisation environnementale multicritère multibâtiment

bâtiment au cours de son cycle de vie. En effet, nous avons expliqué l'urgence de prendre des décisions en accord avec l'objectif planétaire de réduction des émissions de gaz à effet de serre, cependant cet indicateur ne fait pas partie des aires de protection, bien qu'il y contribue. Les indicateurs orientés dommages permettent de traduire un impact plus global, dont l'unité est facile à conceptualiser. Ces indicateurs ne sont pas encore très utilisés en pratique car les normes ne les introduisent pas de manière obligatoire, mais leur intérêt est largement démontré dans la littérature scientifique.

Deux aires de protection sont étudiées dans cette thèse, il s'agit d'une part des dommages à la santé humaine exprimés en année de vie en bonne santé perdues, et des dommages à la biodiversité exprimés en fraction d'espèce disparue sur un territoire et pour une durée donnée. Ces deux indicateurs environnementaux prennent en compte l'ensemble des indicateurs intermédiaires y contribuant, dont le changement climatique. Ainsi, l'évaluation des indicateurs orientés dommages et de l'indicateur du changement climatique sont complémentaires pour permettre une bonne compréhension des enjeux, d'une part l'urgence de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'autre part l'impact global sur la santé humaine et la biodiversité ; cependant, il est important de préciser que ce ne sont pas des indicateurs de même niveau, et les considérer au même niveau impliquerait un double comptage des impacts sur le changement climatique.

Une nouvelle optimisation environnementale du bâtiment L1 a été réalisée avec l'objectif de minimiser les dommages à la santé humaine et le coût d'investissement afin de connaître les solutions optimales de cet indicateur de niveau *endpoint*. L'espace de décision est celui présenté au paragraphe 3.1.2, et les performances thermiques ainsi que les hypothèses environnementales n'ont pas été modifiées. La production d'un kWh d'énergie par une chaudière bois implémentée dans un réseau de chaleur urbain implique la génération de $1,14 \cdot 10^{-7}$ DALY, cette même quantité engendre un dommage de $2,60 \cdot 10^{-7}$ DALY lorsqu'elle est produite par une chaudière gaz au niveau du quartier ; Le réseau de chaleur, alimenté à 54 % de bois et à 46 % de gaz, dont les pertes s'élèvent à 10 %, engendre donc $1,99 \cdot 10^{-7}$ DALY par kWh produit. Enfin la production d'un kWh à partir d'une centrale nucléaire est responsable de $8,44 \cdot 10^{-8}$ DALY.

Les solutions non dominées de cette optimisation sont présentées sur le front de Pareto Figure 3-22, la différence du coût d'investissement par rapport au cas de base varie de -57 à -92 €/m², et les dommages à la santé humaine sont compris entre $3,6 \cdot 10^{-5}$ et $4,5 \cdot 10^{-5}$ DALY/m²/an. Les solutions à faible coût et présentant le plus fort impact sur la santé humaine sont peu nombreuses, elles correspondent aux solutions les moins chères de l'espace de décision dont les besoins de chauffage sont compris entre 45 et 50 kWh/m²/an, tandis que les besoins de chauffage des solutions les plus chères de ce front de Pareto sont d'environ 9 kWh/m²/an.

Une seconde optimisation a été réalisée afin de minimiser les dommages à la biodiversité et le coût d'investissement. La production d'un kWh à partir du réseau de chaleur urbain a un impact de $8,02 \cdot 10^{-8}$ DALY.

02 PDF.m².an. Cet impact correspond à la fraction d'espèces potentiellement disparues dans un territoire et sur une période donnée. Les individus appartenant au front de Pareto final (Figure 3-23) sont responsables de 6,5 à 7,8 PDF.m².an par m² habitable et par an, et la différence de coût d'investissement des solutions par rapport au cas de base varie de -58 à -89 €/m².

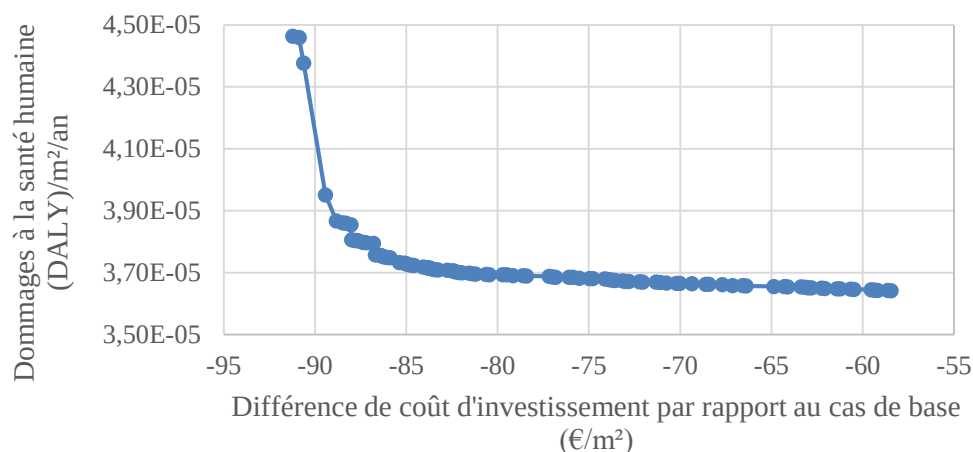


Figure 3-22 : Front de Pareto résultant de la minimisation des dommages à la santé et du coût d'investissement du bâtiment L1

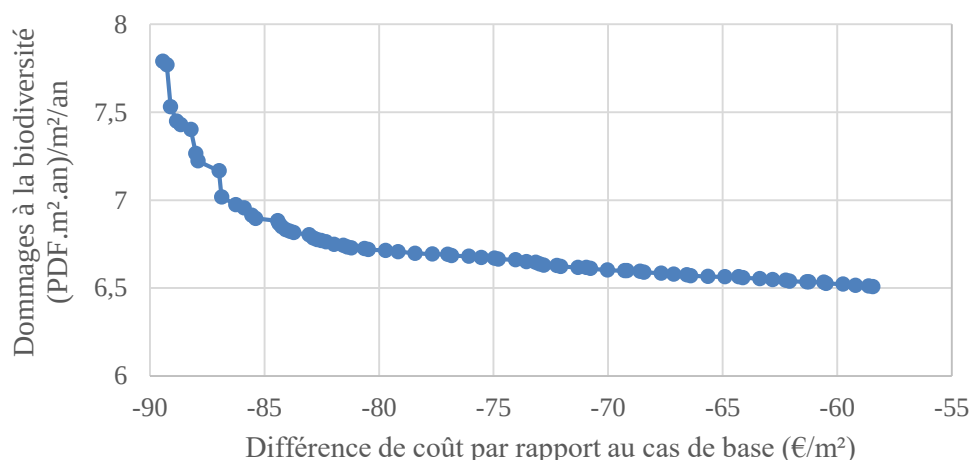


Figure 3-23 : Front de Pareto résultant de la minimisation des dommages à la biodiversité et du coût d'investissement du bâtiment L1

Les résultats de ces deux optimisations sont corrélés avec les résultats de la minimisation des impacts sur le changement climatique et du coût d'investissement ; en effet, comme les impacts sur le changement climatique, les dommages à la santé humaine et à la biodiversité sont étroitement liés aux besoins de chauffage des différentes variantes. La grande majorité des impacts de ces trois indicateurs proviennent de l'étape d'utilisation, elle-même partagée entre les postes suivants :

Chapitre 3. Optimisation environnementale multicritère multibâtiment

- le chauffage du bâtiment (RCU) ;
- la production d'eau chaude sanitaire (RCU) ;
- l'électricité spécifique (mix dynamique attributionnel français, majoritairement alimenté par des centrales nucléaires) ;
- l'électricité auxiliaire nécessaire à la ventilation du bâtiment (mix dynamique attributionnel français).

Or la production d'eau chaude sanitaire et l'électricité nécessaire à l'utilisation des appareils électroménagers et électroniques ainsi qu'à la ventilation ne dépendent pas des variables de décision de l'optimisation ; seules les caractéristiques thermiques du bâtiment sont modifiées, ainsi le chauffage est l'unique poste optimisé. Les impacts environnementaux sont alors très dépendants des besoins de chauffage affichés à la Figure 3-16, et les individus du front de Pareto des trois optimisations présentées jusqu'à présent sont similaires. En effet, les extrémités du front correspondent d'une part aux solutions les moins chères et aux besoins de chauffage élevés, d'autre part aux besoins de chauffage les plus faibles de l'ensemble de l'espace de recherche.

La composition des individus du front de Pareto final de l'optimisation des dommages à la santé humaine et du coût d'investissement est détaillée Figure 3-24, cela confirme l'explication précédente ; les individus sont très similaires aux individus résultants de l'optimisation au paragraphe 3.2.1.1. L'épaisseur de laine de verre au sein des murs extérieurs augmente par palier ; les solutions les moins chères contiennent très peu d'isolant, ce qui implique d'importants besoins de chauffage, donc des impacts élevés sur la santé. Le minimum de surface vitrée est imposé dans chaque solution du front afin de réduire simultanément le coût et les besoins de chauffage ; le pourcentage d'ouvertures par rapport aux parois opaques n'est donc pas représenté sur cette figure, il est égal à 20 % pour l'ensemble des individus du front. Enfin, le type de vitrage dépend de l'orientation des façades, avec tout de même une homogénéité pour les solutions les moins chères qui contiennent toutes du double vitrage ; environ la moitié des solutions contiennent du triple vitrage au nord, tandis que seulement 9 % ont du triple vitrage au sud. En effet, le triple vitrage permet de réduire les besoins de chauffage particulièrement sur la façade nord mais son coût d'investissement est important. Les façades ouest et est ne présentent pas de résultats constants quant au type de vitrage installé, le double et le triple vitrage font partie des différentes solutions du front de manière hétérogène ; leur alternance ainsi que la mise en place de différentes épaisseurs d'isolant dans le plancher bas et la toiture permettent d'obtenir les meilleurs compromis en terme de coût d'investissement et de dommages à la santé.

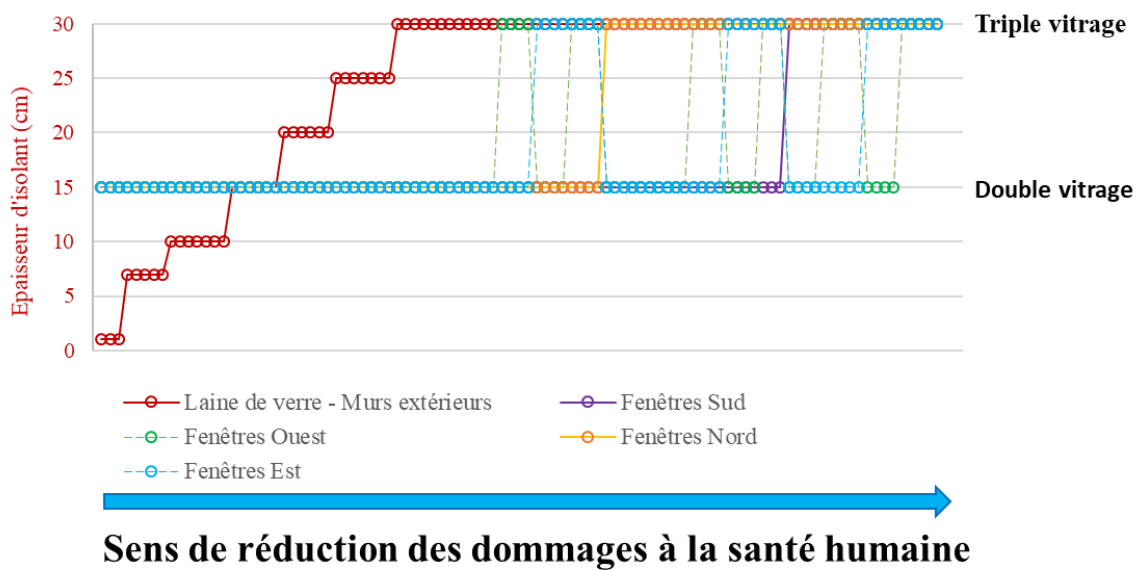


Figure 3-24 : Ordre des choix les plus efficaces pour réduire les dommages à la santé humaine

Les individus du front de Pareto de la minimisation des dommages à la biodiversité ne sont pas présentés car ils sont similaires aux individus présentés à la Figure 3-24. Cependant, on remarque à la Figure 3-23 l'absence du « saut » présent sur les fronts de Pareto des optimisations du changement climatique et des dommages à la santé, provenant d'un écart de 20 kWh entre deux solutions consécutives du front. En effet, l'augmentation de l'épaisseur d'isolant de 1 cm à 7 cm réduit considérablement les besoins de chauffage. Aucun des individus résultant de l'optimisation des dommages à la biodiversité ne contient 1 cm d'isolant dans les murs extérieurs, les solutions les moins chères ne sont pas atteintes au cours de la convergence de l'algorithme. Ce dernier n'a donc pas exploré toute la diversité du front, bien que les résultats soient tout de même satisfaisants, car les individus les moins chers appartenant au front de Pareto permettent tout de même un gain de 89 €/m² par rapport au cas de base. Afin d'améliorer la diversification des solutions du front, il serait intéressant de modifier l'échantillonnage de Sobol en intégrant la solution la moins chère dans la population initiale.

3.2.2 Indicateurs de flux

La minimisation des indicateurs ACV ayant été réalisée, nous nous intéressons désormais aux indicateurs de flux. En effet, comme l'indicateur midpoint de changement climatique, certains indicateurs de flux sont communément maîtrisés par les acteurs du secteur du bâtiment. Il s'agit notamment de la consommation d'énergie primaire, de la quantité de déchets produits et de l'eau utilisée. Nous considérons également la quantité produite de déchets radioactifs car ces derniers ne sont pas encore véritablement considérés dans les dommages à la santé humaine et à la biodiversité, bien qu'ils aient un réel impact sur les générations futures concernant notamment les émissions radioactives.

auxquelles la population pourrait être exposée, ainsi que le danger d'un potentiel conflit. Les optimisations de ces critères ainsi que du coût d'investissement sont présentées dans cette partie.

3.2.2.1 Énergie primaire

La demande cumulative d'énergie correspond à la demande totale, exprimée en énergie primaire, associée à la production et à l'usage d'un bien. Les résultats de l'optimisation de ce critère et du coût d'investissement présentés à la Figure 3-25 dépendent, comme les précédentes optimisations, des besoins de chauffage. Cependant, on observe une concentration plus importante des solutions ayant un faible coût d'investissement, c'est-à-dire des individus comprenant uniquement 1 cm de laine de verre dans les façades. Cette concentration de solutions décline 8 combinaisons possibles avec 1 cm d'isolant dans les façades, le minimum de surfaces vitrées et du double vitrage ; les gènes représentant l'épaisseur des isolants présents dans le plancher bas et dans la toiture prennent différentes valeurs afin de trouver les solutions non dominées dont les besoins de chauffage sont d'environ 45 kWh/m²/an. L'ensemble des solutions consomme entre 840 et 1100 kWh/m²/an d'énergie primaire, ce qui correspond à une différence d'investissement par rapport au cas de base allant de -57 à -93 €/m².

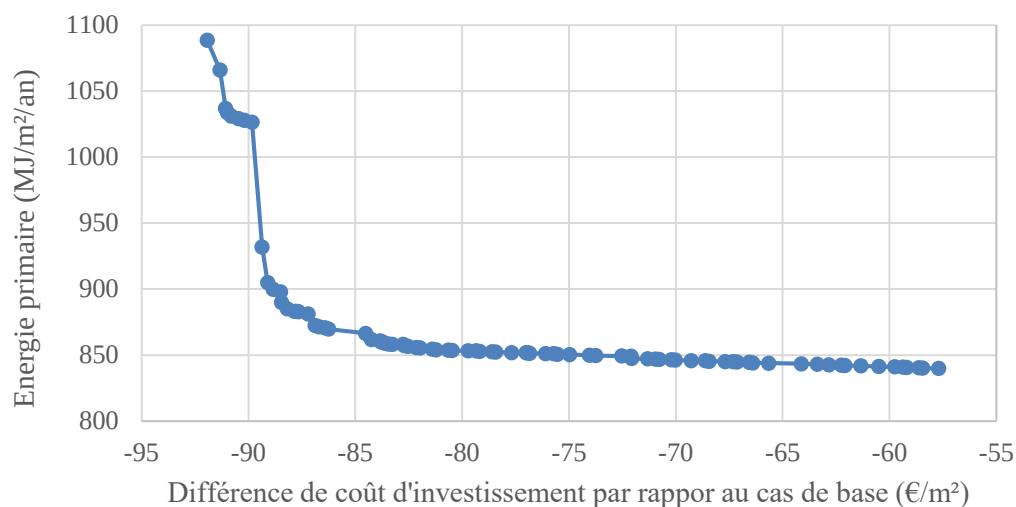


Figure 3-25 : Front de Pareto final de l'optimisation visant à minimiser la consommation d'énergie primaire et le coût d'investissement du bâtiment L1

3.2.2.2 Déchets produits

Nous avons montré dans le deuxième chapitre que la majorité des impacts environnementaux proviennent de l'étape d'utilisation, excepté la production de déchets. Les étapes de construction, d'utilisation et de rénovation contribuent toutes trois de manière significative à cet indicateur. L'étape de fin de vie contribue faiblement à l'indicateur des déchets produits car une grande partie des éléments du bâtiment sont valorisés ou incinérés en fin de vie ; le béton est recyclé sous forme de gravier concassé,

l'acier est entièrement réutilisé, les fenêtres, les portes, le PVC et le polyuréthane sont incinérés. D'autres éléments tels que le plâtre et la laine de verre sont supposés mis en décharge. Le coût d'investissement des individus du front de Pareto final varie de -89 €/m² à 15 €/m², la diversité des solutions du front présenté à la Figure 3-26 est relativement importante mais l'indicateur sur les déchets varie très peu.

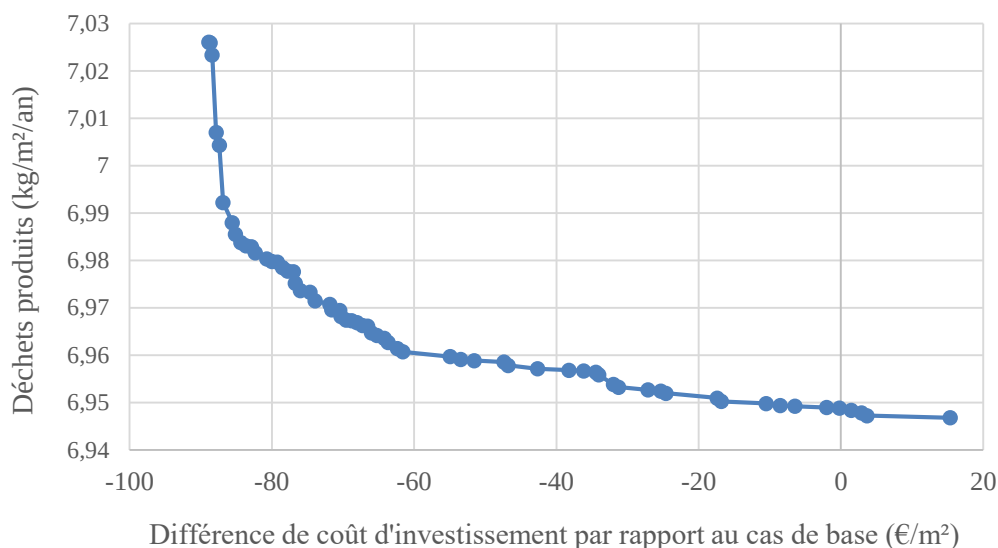


Figure 3-26 : Front de Pareto final résultant de la minimisation des déchets produits au cours du cycle de vie du bâtiment L1 et de son coût d'investissement

Tandis que tous les individus des fronts de Pareto des optimisations précédentes imposaient le minimum de surface de vitrage contenu dans l'espace de recherche, la minimisation de la production de déchets présente des solutions comprenant différentes tailles de fenêtres ; le pourcentage d'ouvertures par rapport à la surface de parois opaques varie de 20 à 50 %, comme le permet l'espace de recherche. En effet, les fenêtres sont incinérées en fin de vie donc elles n'émettent que très peu de déchets, cependant leur coût d'investissement est élevé. De plus, les fenêtres augmentent les besoins de chauffage qui sont également responsable d'une partie des déchets produits. Il s'agit alors de trouver un compromis entre le coût des fenêtres, les déchets en fin de vie et les besoins de chauffage, d'autant plus que la réduction de la taille des fenêtres permet de baisser les besoins de chauffage, mais augmente la surface des parois opaques composées de béton, de laine de verre et de plâtre, ces deux derniers éléments augmentant le poids de la production de déchets. Les surfaces des fenêtres au sein des individus du front de Pareto final sont présentées Figure 3-27 selon l'orientation des façades.

Cependant, la variation de la quantité de déchets produits entre les différents individus ne varie que très faiblement ; la grande majorité des déchets vient de la fabrication de l'acier présent dans la structure du bâtiment, de la fabrication des équipements sanitaires et électriques dont la durée de vie est fixée respectivement à 20 et à 50 ans, et de l'eau nécessaire aux traitements d'assainissement des eaux usées

et au refroidissement des centrales nucléaires qui alimentent le mix électrique à hauteur de 76 %. Ces résultats dépendent en grande partie des hypothèses ACV définies, en particulier du traitement des déchets en fin de vie. La quantité de plâtre et de laine de verre nécessaires à la construction du bâtiment influence les déchets produits au cours du cycle de vie mais légèrement, car leur poids est faible. La variation du poids des déchets produits serait plus significative si le béton et l'acier n'étaient pas recyclés et réutilisés en fin de vie, ce qui montre l'intérêt de valoriser les déchets en fin de vie. Cette optimisation présente une application spécifique de cet outil, il reviendra à l'utilisateur de l'adapter à son projet. Ce développement permet aussi de modifier les données environnementales, ce qui est fait pour le type de vitrage, ainsi il est possible d'inclure dans l'espace de recherche différents traitements des déchets en fin de vie.

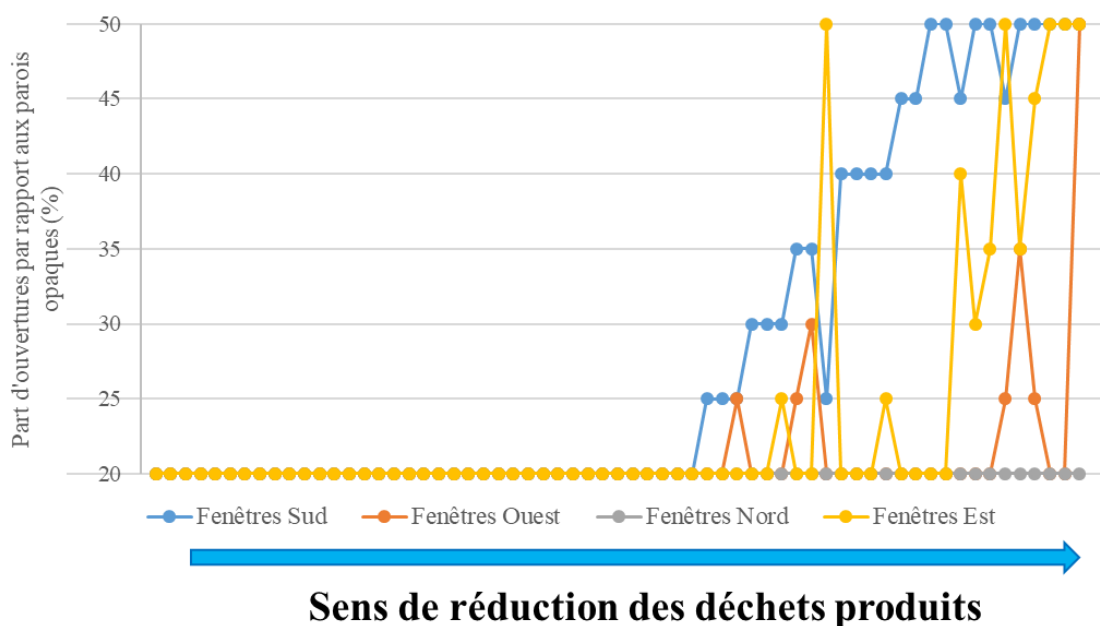


Figure 3-27 : Pourcentage d'ouvertures à mettre en œuvre pour réduire la quantité de déchets produits

3.2.2.3 Déchets radioactifs

Les déchets radioactifs sont des matières qui contiennent de la radioactivité pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est envisagée. Il s'agit de gravats, d'outils, de gants, de combustibles usés, etc. L'industrie électronucléaire produit la majorité des déchets nucléaires, qui proviennent de la production d'énergie dans les centrales nucléaires, de la déconstruction de ces centrales et du recyclage du combustible usé. Les déchets radioactifs liés au cycle de vie d'un bâtiment proviennent donc de l'électricité nucléaire, qui alimente environ trois quarts du mix électrique français. Le bâtiment de logements L1 du cas d'étude étant rattaché à un réseau de chaleur urbain alimenté en gaz et en bois pour la production de chaleur, l'électricité spécifique et auxiliaire sont responsables de la majorité des déchets radioactifs créés au cours du cycle de vie de ce bâtiment. L'optimisation des déchets radioactifs et du

coût d'investissement a été effectuée, les postes d'électricité sont responsables de 95 à 97 % des déchets radioactifs des solutions du front de Pareto. Or, comme on a pu le préciser lors de l'optimisation des déchets inertes, l'électricité ne dépend pas des variables de décision de l'optimisation, qui n'est alors pas très pertinente. Il serait intéressant d'étudier la variabilité stochastique des scénarios d'occupation et d'électricité spécifique des logements pour ajuster ces résultats (Vorger, 2014).

Cependant, l'occupation d'un bâtiment et la puissance dissipée sont des paramètres qui ne peuvent pas être optimisés en phase de conception du bâtiment, car cela ne relève pas du travail de l'ingénieur mais des décisions prises concernant l'occupation des logements, et de la manière dont ces derniers sont utilisés. Nous pouvons tout de même effectuer un travail de prévention en comparant plusieurs variantes environnementales afin, par exemple, que les occupants privilégient des appareils électroménagers à haute efficacité énergétique, et la mise en veille ou l'arrêt des appareils lorsqu'ils ne sont plus utilisés, afin de les sensibiliser aux consommations d'énergie ainsi qu'à leur facture énergétique.

Les consommations relatives au chauffage du bâtiment des solutions du front de Pareto représentent entre 0,4 et 2,3 % des déchets radioactifs du cycle de vie, et les étapes de construction, de rénovation et de fin de vie n'ont qu'une très faible influence sur la quantité de déchets radioactifs. Ainsi, les individus du front de Pareto sont similaires aux individus résultant des optimisations dépendant en majorité des besoins de chauffage. Le coût d'investissement des solutions du front varie de - 57 à - 91 €/m² par rapport au cas de base, et les déchets radioactifs varient de $8,36.10^{-03}$ à $8,52.10^{-03}$ kg/m²/an

3.2.2.4 Eau utilisée

De même que la production de déchets, la quantité d'eau utilisée dépend des scénarios convenus dans le cas d'étude. L'étape d'utilisation est responsable de la quasi-totalité de l'eau consommée ; au cours de cette étape deux postes sont prépondérants dans la consommation d'eau : l'utilisation des occupants pour leur besoin personnel d'eau froide et d'eau chaude sanitaire, et l'électricité spécifique, provenant en grande partie de l'énergie nucléaire nécessitant des quantités importantes d'eau pour le refroidissement des centrales. La consommation d'eau des solutions du front est presque constante, elle varie de 0,8 % entre la solution la moins chère et la solution la plus chère. Cependant, la production de chauffage implique une très faible consommation d'eau mais est la seule variable, les solutions non dominées correspondent aux solutions minimisant les besoins de chauffage.

3.3 Optimisation sous contrainte

Dans la partie précédente, nous avons montré l'application de l'optimisation multicritère à différents indicateurs environnementaux. Les optimisations effectuées avaient pour but de trouver les solutions non dominées correspondant à un compromis entre l'indicateur environnemental étudié et l'aspect

économique du projet. Il est possible d'augmenter le nombre de critères, mais aussi d'ajouter une contrainte, sous la forme d'un seuil à ne pas dépasser concernant un paramètre du bâtiment. Il peut s'agir de la consommation énergétique du bâtiment pour l'obtention d'un bâtiment à énergie positive s'il existe une production au sein du bâtiment. Cet aspect a été étudié dans des travaux de thèse précédents (Frossard, 2020 ; Recht, 2016). Un enjeu de taille lors de la conception des bâtiments n'a pas été pris en compte dans les optimisations présentées précédemment, il s'agit du confort d'été. Le confort thermique en hiver est maîtrisé par la température de consigne du chauffage fixée à 21°C tout l'hiver ; cependant aucun système de climatisation n'a été installé, la surventilation nocturne permettant de diminuer suffisamment les températures estivales du bâtiment initial pour une année type climatique moyenne correspondant à la période de janvier 1994 à décembre 2008. Afin de contrôler le confort d'été, on introduit une nouvelle variable : le taux d'inconfort. Il s'agit du rapport entre le nombre d'heures au cours desquelles la température intérieure du bâtiment est supérieure à 27°C, et le nombre d'heures dans l'année. La réglementation RE2020 base le calcul d'inconfort sur les degrés heures, c'est également une possibilité, qui permet de prendre en compte l'amplitude des vagues de chaleur.

Une fois que la démarche et le calcul du taux d'inconfort sont introduits, le seuil d'inconfort à ne pas dépasser doit être déterminé. Malheureusement aucune configuration de l'espace de décision ne permet d'atteindre un taux d'inconfort de 0 % ; il faudrait alors modifier l'espace de décision ou les scénarios de ventilation et de surventilation, introduire un scénario d'occultation solaire puis, si besoin, dimensionner un système de refroidissement adéquat. Nous fixons alors un seuil d'inconfort de 0,5 % sur l'année, cela correspond à 45 heures maximum dépassant la température de 27°C, principalement au cours des mois de juin, juillet et août. D'autre part, ramené à ces trois mois, le seuil de 45 heures d'inconfort correspond à un taux d'inconfort de 2 %. Comme précisé l'inconfort est calculé à partir du nombre d'heures durant lesquelles la température annuelle dépasse 27°C, il serait également envisageable de prendre en compte le confort adaptatif, évoluant en fonction de la température extérieure.

Une optimisation environnementale à deux critères et une contrainte a été réalisée ; l'objectif est de minimiser l'impact sur le changement climatique et le coût d'investissement du bâtiment, tout en conservant un taux d'inconfort inférieur à 0,5 % au cours de l'année. Les solutions non dominées sont présentées sur le front de Pareto Figure 3-28. La différence du coût d'investissement des individus du front par rapport au cas de base s'élève à - 57 €/m² pour les solutions les plus chères, et à - 87 €/m² pour les solutions les moins chères. Certaines solutions de l'optimisation sans contrainte, présentée au paragraphe 3.2.1.1, sont absentes du front de Pareto de l'optimisation avec contrainte ; il s'agit des individus ayant des besoins de chauffage importants, très peu isolés et comprenant du double vitrage. Ces caractéristiques impliquent une faible performance énergétique, qui se traduit par des échanges de chaleur importants avec l'extérieur, c'est-à-dire un bâtiment froid en hiver et donc des besoins de chauffage élevés, et une température intérieure élevée en été impliquant un taux d'inconfort dépassant

le seuil acceptable. C'est pour cela que les solutions les moins chères du front de Pareto sous contrainte de la Figure 3-28 sont plus chères que les solutions du front résultant de l'optimisation sans contrainte (Figure 3-17), et que les émissions de gaz à effet de serre maximales s'élèvent à près de 12 kgCO₂eq./m²/an/m²/an, contrairement à 17,5 kgCO₂eq./m²/an dans l'optimisation sans contrainte.

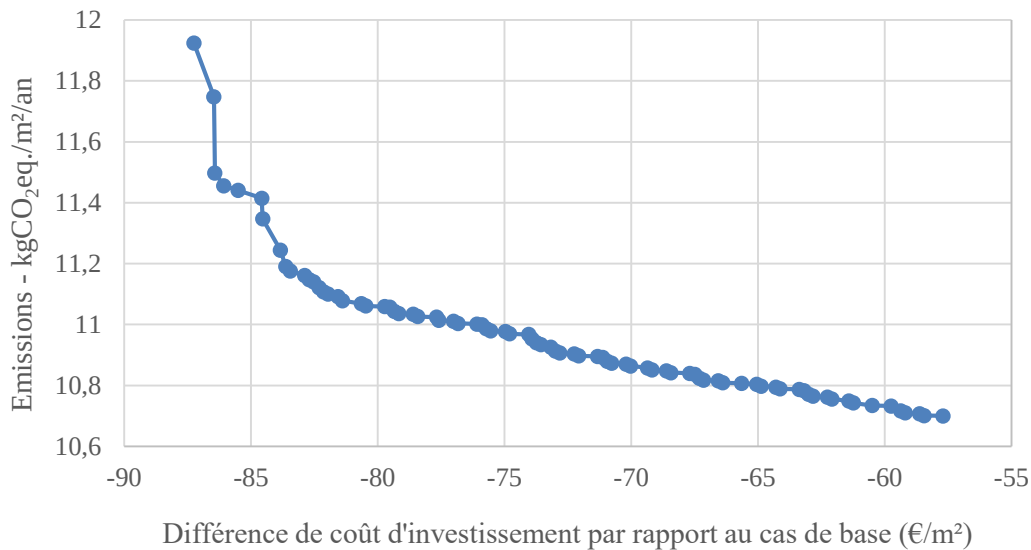


Figure 3-28 : Front de Pareto final de l'optimisation environnementale multicritère sous contrainte

Le front de Pareto de l'optimisation avec une contrainte d'inconfort contient moins de solutions que le front de l'optimisation sans contrainte, pour les raisons que nous avons citées précédemment : les individus les moins chers de l'espace de décision ne respectent pas la contrainte, ils ne font donc pas partie des solutions non dominées. L'épaisseur d'isolant est le paramètre qui diffère le plus entre les solutions des optimisations avec et sans contrainte, il est représenté à la Figure 3-29. Toutes les solutions comprennent le minimum de surface de vitrage de l'espace de décision, soit 20 %, et le type des vitrages évolue de manière similaire aux solutions de l'optimisation sans contrainte, présentées à la Figure 3-21. La mise en place de la contrainte impose une épaisseur de l'isolation des murs extérieurs supérieure à 10 cm, et les différents paliers de 10, 15, 20 et 25 cm de laine de verre dans les façades comprennent moins de solutions que les mêmes paliers de l'optimisation sans contrainte. Sur l'ensemble des solutions du front de Pareto de l'optimisation mettant en place une contrainte d'inconfort, 84 % d'entre elles contiennent 30 cm de laine de verre dans les façades, tandis que concernant les solutions de l'optimisation sans contrainte, seulement 61 % comprennent 30 cm d'isolant. Cela correspond respectivement à 68 et 57 solutions.

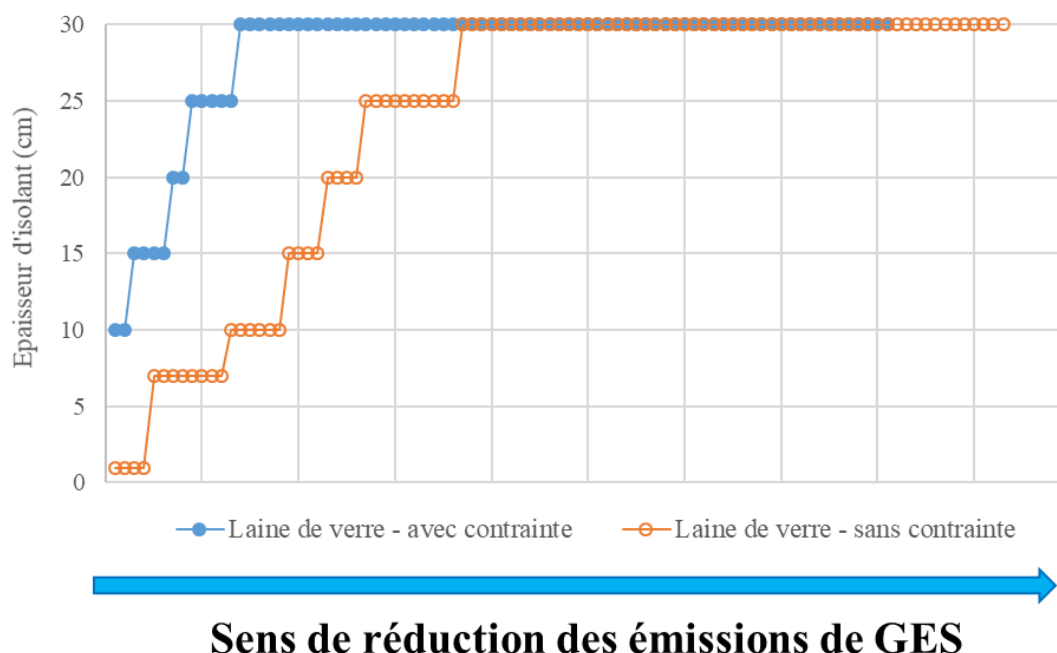


Figure 3-29 : Épaisseur de laine de verre dans les façades des solutions résultant de la minimisation des émissions de gaz à effet de serre et du coût d'investissement avec et sans contrainte

3.4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons présenté les développements d'une procédure d'optimisation environnementale multicritère multibâtiment ; deux méthodologies intégrant un algorithme NSGA-II ont été implémentées et comparées afin de définir la plus pertinente. Le choix s'est alors porté vers la méthode monobâtiment suivie d'un post-traitement qui est plus performante que la méthode multibâtiment. La convergence et la robustesse de cette méthode ont été démontrées, et une méthode pour trouver le paramétrage optimal a été présentée. Certains paramètres d'optimisation ont été déterminés dans ce chapitre et seront appliqués par la suite ; il s'agit d'un algorithme comprenant 100 individus et 20 générations, la population initiale est créée à partir d'un échantillonnage par séquence de Sobol, et les taux de croisement et de mutation sont respectivement fixés à 0,9 et 0,15 .

Cette méthode d'optimisation a ensuite été appliquée à un cas d'étude de bâtiment, l'ensemble des indicateurs sélectionnés au chapitre 2 ont été optimisés simultanément au coût d'investissement du bâtiment. Nous avons alors montré que, dans ce cas d'étude où l'espace de décision est réduit, la plupart des impacts environnementaux dépendent fortement des besoins de chauffage, la performance énergétique d'un bâtiment doit donc être optimisée au maximum, mais d'autres variables créent des impacts non négligeables pour certains indicateurs, telles que la quantité d'électricité spécifique et l'eau utilisée. Il est important de préciser que cette application est spécifique au bâtiment de logements collectifs L1 et aux hypothèses qui lui ont été associées ; l'affinage des hypothèses environnementales

permettra notamment de mieux prendre en compte l'impact des étapes de fabrication, de rénovation et de fin de vie.

Enfin, nous avons montré la possibilité, et la nécessité éventuelle d'ajouter une contrainte à l'optimisation multicritère.

4 Conception paramétrique

Ce chapitre présente un développement informatique permettant la réalisation de la démarche d'écoconception en phase amont de conception. L'association des outils de modélisation 3D, de variation paramétrique et de simulation thermique et environnementale des bâtiments permet d'évaluer l'influence de la forme d'un bâtiment sur l'environnement. Cette démarche peut être appliquée à l'échelle d'un sous-ensemble de bâtiments ou d'un îlot pour contribuer aux décisions concernant le plan d'aménagement urbain.

4.1 Introduction

L'état de l'art présenté dans le premier chapitre de cette thèse a précisé l'importance d'effectuer l'étude environnementale des bâtiments en phase amont des projets, lorsque les décisions importantes sont prises, sur le principe d'écoconception. Le concept architectural influence les besoins thermiques et les impacts environnementaux des bâtiments, mais il ne peut généralement plus être modifié lorsque les études environnementales sont effectuées. Le projet se trouve alors dans un état avancé, et des changements impliqueraient des coûts conséquents. Or les impacts environnementaux des projets de conception et de rénovation de bâtiments ne peuvent plus être considérés comme un objectif secondaire au vu des enjeux planétaires : le processus de conception doit alors être modifié.

Le logiciel Pleiades permet de modéliser un bâtiment et d'étudier ses propriétés thermiques ainsi que son impact environnemental. L'optimisation des caractéristiques du bâtiment au sein des quartiers est également réalisable à travers le module Amapola et les compléments apportés au cours de cette thèse, qui ont été présentés au chapitre 3. Cet outil permet donc de répondre en partie aux enjeux environnementaux du secteur du bâtiment qui nécessitent une évaluation fiable des projets afin de pouvoir comparer l'impact d'un bâtiment par rapport aux pires et aux meilleures pratiques, mais aussi de connaître l'influence des différents paramètres du bâtiment dans le but de guider les décideurs vers des solutions à moindre impact. Cependant, le logiciel est conçu et développé pour des ingénieurs exerçant, pour la plupart, en bureau d'études. La priorité repose désormais sur l'accès à ces fonctionnalités dans les phases antérieures aux études techniques, généralement menées par les architectes. Il semble alors nécessaire de rendre le logiciel accessible aux architectes et aux urbanistes afin de leur permettre d'étudier l'influence de la forme du bâtiment et du plan masse du quartier sur la performance environnementale. Pour cela, l'outil nécessite des fonctionnalités adaptées à ces métiers. De plus, une manière efficace d'étudier l'influence de la forme d'un bâtiment est d'utiliser la méthode de conception paramétrique, afin de modéliser rapidement différentes variantes de bâtiments en vue de comparer leurs impacts environnementaux.

Nous proposons de développer un outil destiné aux architectes et aux aménageurs, leur permettant d'une part de modéliser les premières esquisses de projet à partir d'un outil maîtrisé dans le domaine de l'architecture, d'y appliquer des variations paramétriques et d'évaluer les impacts environnementaux de chaque variante étudiée. Il s'agit du couplage du logiciel de modélisation Rhinoceros 3D et son outil de conception paramétrique Grasshopper, avec le logiciel Pleiades, dont les résultats de thermique et d'analyse de cycle de vie sont éprouvés. Ce développement a pour but de faciliter l'évaluation environnementale dès la phase amont des projets de conception de bâtiments afin de fournir une aide à la décision.

Le modèle proposé permet de prendre en compte les critères géométriques des bâtiments dès la phase amont, d'intégrer les impacts environnementaux de la structure correspondant à la forme proposée et de comprendre son influence à travers les variations paramétriques. L'extension de ce modèle à l'échelle du quartier permettrait d'intégrer d'autres leviers d'action car le plan d'aménagement urbain pourrait être défini en fonction des aspects environnementaux en plus des critères imposés par l'aménageur ou le territoire.

L'approche choisie pour développer cet outil d'aide à la décision se base sur la méthodologie BIM (*Building Information Modelling*), qui vise à faciliter la communication et la gestion de données entre les différents acteurs d'un projet de conception. L'ensemble du cycle de vie du projet de conception du bâtiment est pris en compte, depuis les esquisses jusqu'à la gestion de la fin de vie des éléments. Il s'agit ainsi de permettre la modélisation des données du bâtiment à l'aide d'une maquette numérique partagée pour simplifier les processus de conception, de construction et d'exploitation, afin de guider les prises de décisions.

Ce chapitre présentera dans un premier temps les différents outils nécessaires à la réalisation de ce couplage et le pré-dimensionnement détaillé des matériaux structurels, introduit au chapitre 2. Le fonctionnement du couplage sera ensuite expliqué, puis la troisième partie présentera d'une part l'application de la conception paramétrique à un plan d'aménagement urbain, et d'autre part l'application du couplage à un bâtiment particulier, dont le paramètre de forme étudié est le nombre d'étages.

4.2 Description des outils

4.2.1 Suite logicielle Rhinoceros 3D

Le logiciel Rhinoceros 3D est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) principalement utilisé dans les métiers de l'architecture, du design industriel et de la conception de bijoux. Il comprend de nombreux modules permettant des applications très variées. Rhinoceros 3D, communément appelé Rhino, est développé par Rober McNeel & Associates et comprend l'avantage d'être disponible pour les systèmes d'exploitation Microsoft Windows et macOS.

4.2.1.1 Rhinoceros 3D

Rhino utilise la technique de modélisation par courbes qui consiste à modéliser en travaillant sur des courbes plutôt qu'en reliant des polygones. L'outil peut créer, éditer, documenter, animer et traduire des courbes, des surfaces, des solides, des nuages de points et des maillages sans limite en terme de complexité, de degré ou de taille. Toutes les formes peuvent être créées et visualisées grâce aux outils

Chapitre 4. Conception paramétrique

de modélisation 3D avec une précision permettant de modéliser et d'analyser tous types d'objets, tels que des bijoux ou des avions. Rhino est compatible avec de nombreux logiciels de conception, d'ingénierie et d'analyse, et est accessible grâce à son aspect intuitif et rapide. De plus, les développements impliquent les utilisateurs, qui peuvent essayer, tester et commenter les versions futures en cours de développement. Quelques outils spécifiques de Rhino sont présentés ci-après.

- Les outils de création de modèle : la modélisation de structures complexes est rendue possible par la combinaison d'outils destinés au dessins, tels que les points, les courbes, les courbes à partir d'objets, les surfaces, les solides et les maillages ainsi que les fonctionnalités qui les complètent comme extraire des objets, interpoler des points ou encore extruder des surfaces ;
- L'édition de modèles complexes : les outils d'édition permettent d'apporter des modifications aux structures créées (suppression, fusion, prolongation etc.), de les transformer (déplacer, rotation, tordre, courber projeter etc.), de les reconstruire ou les modifier à travers l'utilisation de points et de courbes. Les surfaces, solides et les maillages peuvent également être édités, et il est possible d'y appliquer des opérations booléennes (union, différence, intersection) ;
- Interface : la visualisation des objets est disponible selon différents plans, la vue en perspective est également disponible, et les types d'affichage sont nombreux. De plus, les commandes peuvent être sélectionnées directement sur l'interface ou appelées sous forme de fonctions ;
- Rendu et présentation : le rendu est de haute qualité, les textures, les reliefs, la transparence et de nombreux autres effets peuvent être mis en évidence ;
- Fabrication numérique : les premières applications de Rhino portaient sur la réalisation de modèles informatiques pour diriger des machines de fabrication numérique dans les chantiers navals. Le domaine d'action s'est élargi et l'outil se veut désormais accessible à tous les procédés impliqués dans la réalisation d'un concept ;
- Mise en plan : la création de plans et d'illustrations est facilitée par les objets d'annotation dont les flèches, les points et les cotes ;
- Compatibilité : Rhino est compatible avec de nombreuses applications qui peuvent lire des fichiers .3dm exportés depuis Rhino.

Rhino comprend également des outils de développement open source, accessibles à tous les utilisateurs possédant une licence valide. La compatibilité avec l'éditeur de scripts RhinoScript et le langage d'écriture Rhino.Python dévoile une grande partie du mécanisme interne de Rhino, permettant ainsi de développer des scripts plus puissants, adaptés au problème étudié.

Enfin, cet outil de modélisation 3D est robuste pour l'architecture, il permet de réaliser des formes créatives, notamment concevoir des toits de forme libre, des façades paramétriques ou encore des

structures complexes. De plus, Rhino, combiné avec ses multiples outils, propose différentes analyses comme l'analyse météorologique, l'analyse de la lumière naturelle et l'analyse structurelle.

4.2.1.2 Grasshopper

L'application logicielle d'algorithmique graphique Grasshopper s'exécute avec Rhinoceros 3D. Cet outil de programmation visuelle n'est pas un langage de programmation. Il ne demande aucune connaissance en programmation ou en écriture de scripts ; il permet aux utilisateurs de mettre au point des algorithmes de génération de forme en connectant les composants les uns aux autres suivant un schéma constructif unique. Chaque composant se présente sous la forme d'une boîte avec des entrées et des sorties, qui permettent de transformer tout type de variable. Grasshopper transforme la programmation algorithmique en un assemblage visuel de briques élémentaires et la rend ainsi accessible à tous pour résoudre les problèmes complexes de conception. De plus, l'outil de recherche de mots clés permettant de trouver le composant à insérer est utile pour les personnes novices.

Conçu notamment pour le dessin paramétrique, Grasshopper est très utilisé dans le cadre de la comparaison de variantes de par sa facilité d'usage ; il suffit de changer un paramètre sur Grasshopper pour que le dessin Rhino soit modifié en conséquence. Rhino et Grasshopper permettent d'étudier un large éventail de solutions en créant des systèmes paramétriques avec une visualisation des modifications en temps réel et en reliant ces systèmes aux différentes analyses disponibles dans Rhino. Des listes de choix et des boutons sont intégrés à l'interface afin de permettre à l'utilisateur de piloter directement l'algorithme dans l'interface de développement.

Rhino Grasshopper s'est imposé dans le domaine de l'architecture grâce à sa capacité à manipuler les structures pour la création de formes architecturales très avancées, sans être limité par certaines propriétés. L'outil Grasshopper peut également être utilisé pour la fabrication, l'analyse des performances et l'ingénierie structurelle. Grasshopper comprend ainsi toutes les fonctionnalités utiles dans le cadre d'une comparaison de variantes ou d'une optimisation, notamment pour la conception paramétrique de bâtiments.

4.2.1.3 Outils ladybug

La suite Ladybug est composée d'applications informatiques gratuites et open source dédiées à l'analyse environnementale, permettant de relier des interfaces de conception assistée par ordinateur à une multitude de moteurs de calculs tels que Radiance (simulations d'éclairage), EnergyPlus et OpenStudio (simulations thermiques). Quatre applications composent ces outils, Ladybug, Honeybee, Dragonfly et Butterfly ; elles sont utiles aux métiers de l'architecture et de l'ingénierie.

Ladybug effectue une analyse détaillée des données climatiques et fournit des visualisations personnalisées et interactives pour une conception à moindre impact environnemental. L'outil importe

Chapitre 4. Conception paramétrique

les fichiers standards EnergyPlus Weather (.epw) dans Grasshopper, et exécute une analyse climatique facilitant la prise de décision lors des premières étapes de conception. Son intégration dans un environnement de programmation visuelle comme Grasshopper permet un retour d'information instantané sur les modifications de conception et un haut degré de personnalisation.

Honeybee utilise Radiance pour créer, exécuter et visualiser des simulations de lumière naturelle et OpenStudio/EnergyPlus pour les modèles énergétiques. Son application dans Rhino Grasshopper permet de relier l'environnement de conception assistée par ordinateur à ces moteurs de calcul.

Dragonfly permet la création de modèles à l'échelle du quartier pour la simulation énergétique, la simulation de l'infrastructure électrique, l'optimisation des énergies renouvelables et la modélisation des îlots de chaleur urbains. Enfin, Butterfly est un plugin et une bibliothèque python permettant de créer et d'exécuter des simulations avancées de dynamique des fluides numérique (CFD).

4.2.2 Pleiades BIM

Pleiades comprend un outil BIM dont le but est de fluidifier la conception en mettant à disposition une maquette numérique commune à l'ensemble des phases de travail, évitant ainsi les nouvelles saisies à chaque évolution du projet. Pleiades BIM intègre donc l'étude énergétique en synchronisant le modèle CAO 3D avec le modèle énergétique du bâtiment. Ce module est relié aux différents outils de Pleiades, permettant ainsi d'effectuer les calculs et vérifications suivants :

- La conception bioclimatique et l'analyse du confort thermique (COMFIE)
- L'optimisation d'un projet et la garantie de performance énergétique (Amapola)
- La vérification des exigences réglementaires (RE2020, E+C-, etc.)
- Le dimensionnement des systèmes de chauffage et de climatisation
- La qualité de l'air intérieur (INDALO)

L'openBIM est un programme de coopération universel garantissant l'interopérabilité des logiciels dans le cadre de la maquette numérique libre normalisée. Tous les acteurs du projet sont alors capables de travailler autour d'une même maquette numérique quel que soit le logiciel qu'ils utilisent grâce au format IFC (*Industry Foundation Classes*). Ce dernier est un format orienté objet utilisé par l'industrie du bâtiment pour partager des informations entre les logiciels. Il permet de décrire des objets (murs, fenêtres, espaces, poteaux etc.) et d'assurer la compatibilité de la maquette entre les différents logiciels, garantie de la bonne circulation des données entre les acteurs. De plus, le format IFC contient des informations géométriques facilement exploitables pour l'analyse énergétique. Izuba énergie a fait le choix de travailler sur les format d'échanges ouverts en permettant l'import du format IFC dans Pleiades BIM.

Le second format accepté par Pleiades BIM est également un format d'échange ouvert géré par la majorité des logiciels de CAO et d'ingénierie, il s'agit du format Green Building XML (gbXML). Il comporte la majorité des informations, en particulier géométriques, nécessaires à l'étude énergétique. Avec le développement de capacités d'exportation et d'importation dans plus de 50 outils de modélisation d'ingénierie et d'analyse, le gbXML bénéficie du soutien du secteur et est largement adopté par les principaux fournisseurs de modélisation des informations du bâtiment.

4.2.3 Influence de la structure

L'évaluation environnementale des différents bâtiments créés à partir de la conception paramétrique permet de connaître les réels enjeux du projet et de prendre des décisions en conséquence. Cependant, la modification de la forme d'un bâtiment entraîne également la variation de la quantité d'éléments structurels nécessaires et donc de leurs impacts. Ainsi, le pré-dimensionnement des matériaux structurels présenté au chapitre 2 est nécessaire pour considérer l'ensemble des impacts environnementaux générés par les bâtiments.

Les quantités de béton et d'acier nécessaires aux structures en béton armé varient selon le nombre de niveaux des bâtiments ; concernant le béton, si l'on néglige les éventuels parkings souterrains qui n'ont pas fait l'objet de cette étude, trois utilisations sont à différencier : la quantité nécessaire aux fondations, l'épaisseur équivalente du béton en superstructure au sein des planchers et la quantité à intégrer dans les murs verticaux de la superstructure. Le volume nécessaire par surface de plancher a été déterminé en fonction du nombre d'étages à partir de données de bâtiments existants (Mendes, 2022) pour ces trois catégories, son évolution est présentée à la Figure 4-1. L'épaisseur équivalente de béton est de $0,32 \text{ m}^3_{\text{béton}}/\text{m}^2_{\text{plancher}}$ dans un bâtiment de trois niveaux, et croît avec le nombre d'étages jusqu'à atteindre la valeur de $0,5 \text{ m}^3_{\text{béton}}/\text{m}^2_{\text{plancher}}$ dans un bâtiment de 48 niveaux.

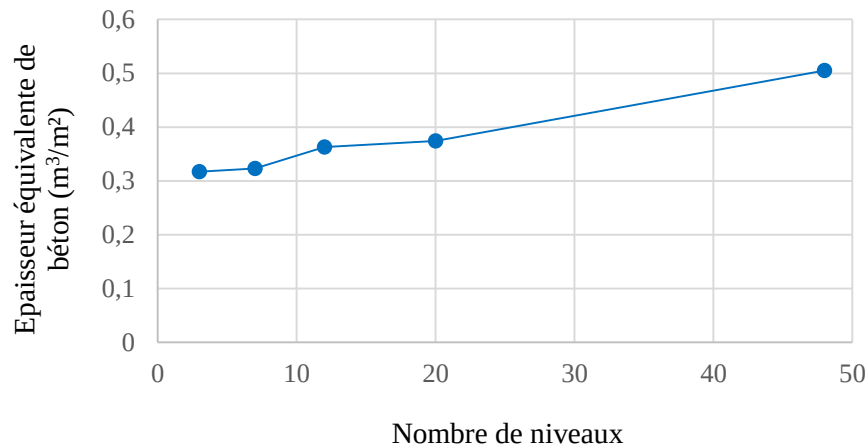


Figure 4-1 : Quantité de béton (fondations + superstructure) en fonction du nombre d'étage

La quantité d'acier au sein des fondations dépend du volume de béton à considérer, dont l'évolution de l'épaisseur équivalente en fonction du nombre de niveaux est présentée à la Figure 2-7. La quantité d'acier à intégrer dans les murs verticaux de la superstructure évolue également en fonction du nombre d'étages. On calcule ainsi la masse totale d'acier à comptabiliser au sein des fondations et de la superstructure en fonction du nombre d'étage, qui est présentée à la Figure 4-2. La quantité d'acier à considérer dans les fondations et dans la superstructure augmente de manière quasi-linéaire avec le nombre d'étages.

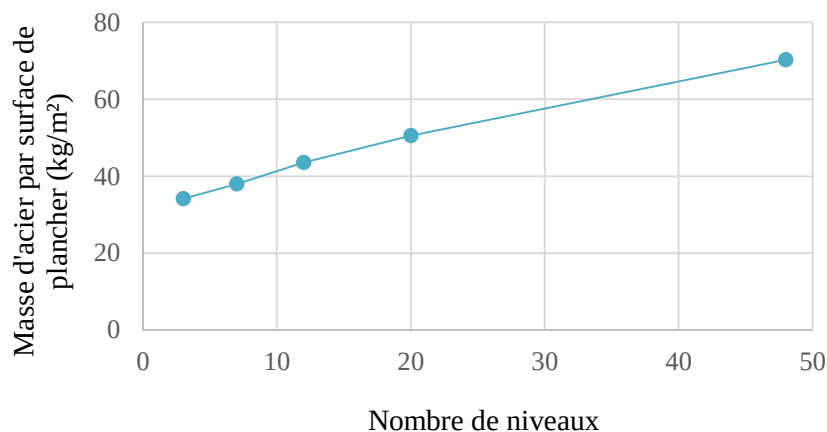


Figure 4-2 : Quantité d'acier (fondations + superstructure) en fonction du nombre d'étages

Enfin, nous avons précisé au chapitre 2 la difficulté de créer une loi générale pour quantifier les matériaux présents dans les structures bois du fait de la grande diversité des méthodes de construction. En effet, de nombreux bâtiments construits en bois ont des structures hybrides, composées de bois et de béton armé. Cependant, l'étude précédente a pu collecter les données de quatre bâtiments de 3, 7, 12 et 15 niveaux ayant une structure uniquement composée de bois. Le volume de béton considéré dans les fondations par surface de plancher est compris entre 0,025 et 0,04 m³_{béton}/m²_{plancher}, l'évolution est

présentée sur la Figure 4-3. Le volume de bois dans les éléments verticaux de la superstructure par surface de plancher augmente de 0,23 à 0,28 $\text{m}^3_{\text{bois}}/\text{m}^2_{\text{plancher}}$ dans les bâtiments de 3 à 12 niveaux, puis semble réduire ou se stabiliser, l'épaisseur équivalente du bâtiment de 15 étages étant de 0,27 $\text{m}^3_{\text{bois}}/\text{m}^2_{\text{plancher}}$. Cette légère baisse est cependant corrélée avec la quantité d'acier dans la superstructure. Les premiers niveaux ne comprennent pas d'acier au sein des éléments verticaux de la superstructure, cependant les forces s'exerçant sur le bâtiment de 15 étages sont plus élevées. Ce dernier nécessite alors une certaine quantité d'acier. Au-delà de 15 niveaux, les bâtiments sont des formes hybrides intégrant du béton, du bois et de l'acier dans la superstructure.

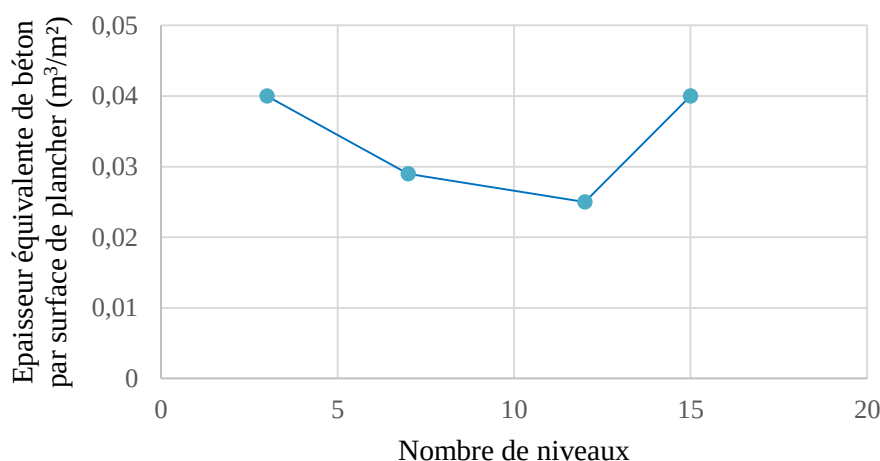


Figure 4-3 : Quantité de béton au sein des fondations des structures bois en fonction du nombre d'étages

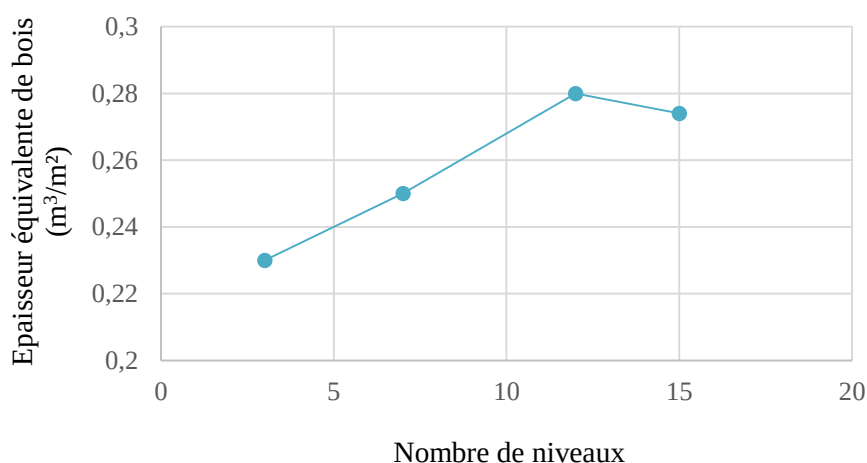


Figure 4-4 : Quantité de bois dans les éléments verticaux de la superstructure en fonction du nombre d'étages

Un plus grand nombre de données, en particulier sur les structures bois, permettrait d'établir une loi d'évolution plus précise. Cependant, cette étude permet d'obtenir un ordre de grandeur des quantités de

matériaux structurels à comptabiliser en fonction de la hauteur des bâtiments, et ainsi d'évaluer les impacts environnementaux associés.

L'interpolation des données présentées permet d'estimer la quantité des matériaux structurels des bâtiments dans le cadre par exemple de la conception paramétrique. Pleiades ACV facilite l'intégration de ces matériaux dans l'évaluation environnementale en permettant leur ajout au sein de l'outil. L'acier n'intervenant pas dans les besoins thermiques du bâtiment, il n'est pas intégré au modèle énergétique du bâtiment et doit donc être ajouté après la STD. Il en est de même pour la masse de béton au sein des fondations.

4.3 Couplage des outils de modélisation et de simulation

4.3.1 Développements informatiques

La suite logicielle Rhino Grasshopper permet de modéliser un bâtiment par le dessin (Rhino) ou à travers des algorithmes graphiques (Grasshopper). L'utilisation étendue de Rhinoceros 3D dans le secteur de l'architecture et la conception paramétrique, facilitée par la programmation visuelle de Grasshopper, nous a conduit à étudier un couplage entre les outils Rhinoceros 3D et Pleiades. Les objectifs sont de rendre les outils de STD et d'ACV plus faciles d'accès aux intervenants de la phase amont des projets de conception de bâtiments, et de leur permettre de générer plus rapidement plusieurs variantes de bâtiments afin de prendre en compte l'aspect environnemental dès les premières décisions, concernant les grands axes des projets. En effet, les impacts environnementaux des bâtiments standards sont majoritairement générés au cours de l'étape d'utilisation, elle-même influencée par les décisions prises lors de la conception du bâtiment, telles que son orientation, l'emplacement des fenêtres ou encore les masques proches créés par les autres bâtiments du quartier impliquant une réduction des apports solaires.

La première partie de ces développements consiste à relier un fichier Rhino contenant la modélisation d'un bâtiment aux outils Ladybug. Pour cela, Grasshopper importe le modèle sous le format B-Rep (Boundary Representation), qui rassemble l'ensemble des surfaces et des solides modélisés sur Rhino. Ensuite, le modèle peut être associé à de nombreux composants compris dans les plug-in Ladybug et Honeybee permettant de décrire le modèle énergétique du bâtiment. Ainsi peuvent être déterminés des zones thermiques selon leur type d'usage, les caractéristiques des fenêtres et leur quantité, ou encore le fichier météorologique associé au projet. La création du modèle énergétique est rendue possible par un composant destiné à exporter le modèle de bâtiment natif de Rhino au format gbXML. Ce composant est inclus dans le plug in Honeybee et fait intervenir l'application d'analyse énergétique du bâtiment Open Studio.

Une fois le fichier gbXML créé, l'outil BIM de la suite Pleiades est utilisé comme intermédiaire afin d'importer le fichier gbXML. La définition de l'enveloppe du bâtiment et du type de fenêtres peut être affinée à ce stade du couplage. Le fichier est ensuite converti dans un format adapté à l'éditeur de Pleiades (.plp), ce qui permet d'effectuer une simulation thermique dynamique. Enfin, les résultats de la simulation thermique et les quantités de matériaux déduites de la maquette numérique servent de base à l'ACV.

L'utilisation de Rhinoceros 3D pour la modélisation du bâtiment est particulièrement utile dans le cas des bâtiments complexes. Il est également possible de générer le bâtiment à partir de Grasshopper, tout en ayant un visuel sur Rhino. Cette option nécessite la maîtrise de l'algorithmique graphique mais a l'avantage d'être rapide pour la modélisation de bâtiments standards, et de fournir un modèle très précis, et ainsi d'éviter les échecs d'exportation pouvant détériorer la maquette numérique. La compatibilité du couplage avec les deux méthodes de modélisation est vérifiée dans les sections suivantes.

Un tel couplage entre les deux suites logicielles Rhino et Pleiades comporte l'avantage de transmettre des données entre les outils utilisés par des acteurs de métiers différents par l'intermédiaire d'une maquette numérique, mais aussi de donner la possibilité, quelle que soit la phase du projet, de modifier un paramètre du bâtiment et d'obtenir instantanément son modèle énergétique permettant la simulation thermique et environnementale, et ainsi de comparer des variantes environnementales à partir d'une seule modélisation.

4.3.2 Présentation du couplage à partir d'une modélisation Rhino

Le couplage a été appliqué à un premier cas d'étude simplifié afin de présenter les différentes étapes qui le composent ; il s'agit d'une maison individuelle de surface habitable 300 m². Cette dernière correspond à un modèle existant proposé dans Rhinoceros 3D ; une modélisation basique a été réalisée à partir de blocs pour différencier des zones thermiques, et intègre les fenêtres sous forme de ratio par paroi. Les données climatiques de Trappes ont été considérées dans cette étude. La représentation 3D de la maison modélisée sur Rhinoceros 3D est présentée sur la Figure 4-5.



Figure 4-5 : Représentation 3D de la maison modélisée sur Rhinoceros 3D

Le modèle est ensuite intégré sous la forme d'un B-Rep au sein de Grasshopper, et certaines fonctions permettant de créer le modèle énergétique du bâtiment pour ensuite le transformer en format gbXML lui sont associées sous la forme d'un schéma constructif représenté Figure 4-6. Le nom complet et abrégé, la description et les entrées de chacune des fonctions appelées dans ce schéma d'algorithmes graphiques sont détaillés dans le Tableau 4-1.

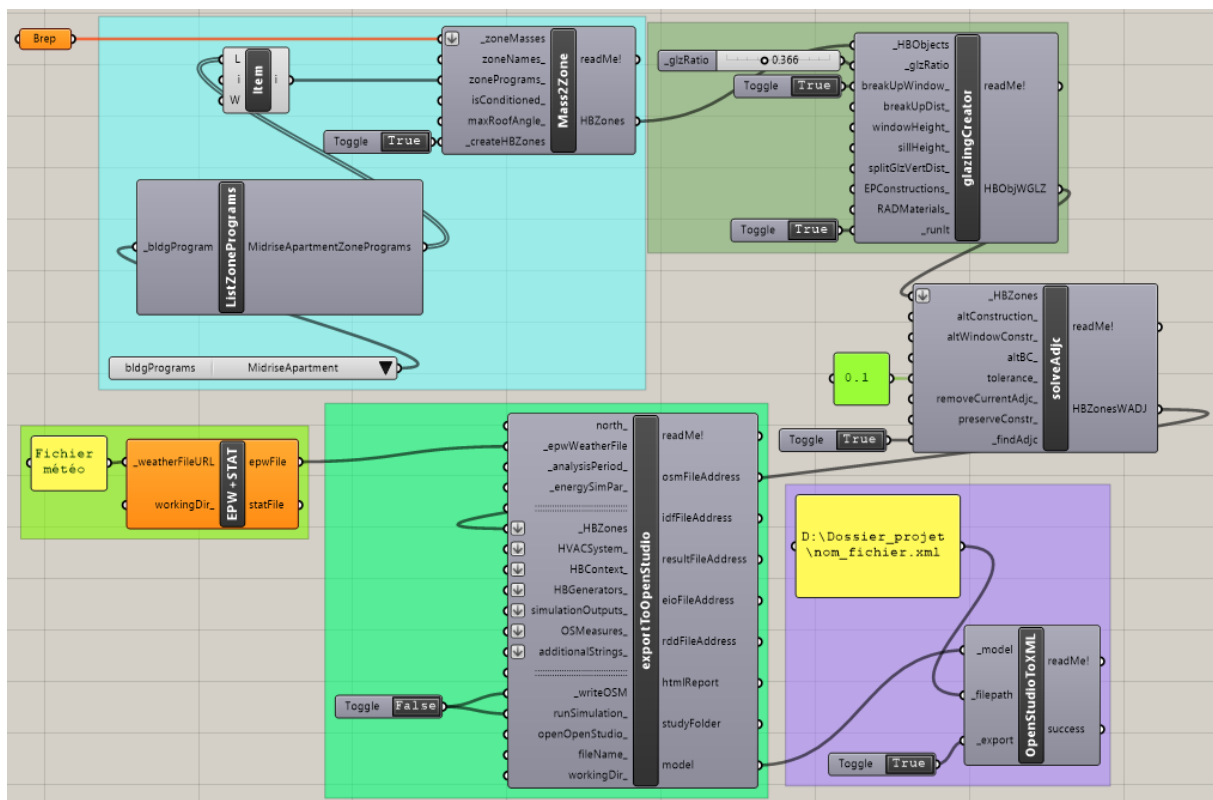


Figure 4-6 : Schéma d'algorithmes graphiques pour l'export d'un modèle Rhino en format gbXML

Tableau 4-1 : Description des composants utilisés dans le fichier Grasshopper

Nom fonction	Description	Entrée
Ladybug_Open EPW and STAT Weather files (EPW+ STAT)	Associe un fichier météo au projet	Fichier météo .epw
Honeybee_ListZonePrograms (ListZonePrograms)	Définit l'usage des zones thermiques	Honeybee_bldgPrograms + sélection de l'usage
Honeybee_Masses2Zones (Mass2Zone)	Transforme un B-Rep en zones thermiques	B-Rep ListZonePrograms
Honeybee_Glazing based on ratio (glazingCreator)	Définition de la surface de vitrages à partir d'un ratio	Mass2Zone Honeybee_glzRatio + ratio souhaité
Honeybee_Solve Adjacencies (solveAdjc)	Crée les contacts entre les zones thermiques	glazingCreator
Honeybee_Export To OpenStudio (exportToOpenStudio)	Exporte les zones Honeybee en un fichier OpenStudio	EPW+ STAT Solve_Adjc
Honeybee_OpenStudio to gbXML (OpenStudioToXML)	Exporte un modèle OpenStudio en fichier gbXML	exportToOpenStudio

Le format gbXML a été choisi pour transmettre le modèle de Rhino à Pleiades car l'outil BIM permet de l'importer, tandis que le format binaire décrivant le modèle thermique Pleiades ne fait pas partie des formats compatibles avec Rhino. Ainsi, l'outil BIM constitue un intermédiaire qui a tout de même l'avantage de fournir un grand degré de liberté à l'export du modèle ; la composition de l'enveloppe peut y être définie ou modifiée si nécessaire ainsi que les informations relatives aux ponts thermiques. Toutes les fonctionnalités de Pleiades sont ensuite disponibles pour être appliquées au projet (STD, Amapola, calcul réglementaire, etc.). La représentation 3D provenant de l'import du gbXML par Pleiades BIM est présentée Figure 4-7.



Figure 4-7 : Représentation 3D de la maison individuelle importée dans Pleiades BIM

Le calcul thermique et l'évaluation environnementale du cas d'étude ont ensuite été effectués avec les mêmes hypothèses de composition des parois que le cas d'étude des Lumières ; chaque paroi isolée contient 15 centimètres d'isolant et la maison est équipée de double vitrage. Des scénarios standards d'occupation, de chauffage, de climatisation et de ventilation pour une famille de quatre personnes sont intégrés, ainsi qu'un scénario d'ouverture de fenêtres si la température extérieure est inférieure à la température intérieure. La température de consigne de chauffage est fixée à 20°C, la température de climatisation à 27°C, la puissance dissipée du logement est de 1,14 W/m² la nuit et en période creuse au cours de la journée en semaine et de 5,70 W/m² le reste du temps ; les infiltrations sont de 0,10 vol/h, la ventilation est fixée à 0,35 vol/h et la surventilation nocturne à 4 vol/h. Les scénarios de ventilation et de puissance dissipée sont tirés de la méthode de calcul Th-BCE 2012. Les données météorologiques utilisées sont celles de la ville de Trappes, qui correspondent au climat de la région Parisienne. Les résultats de l'étude thermique sont présentés dans le Tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Résultats de l'étude thermique de la maison individuelle provenant de l'export de Rhinoceros 3D

Besoins de chauffage	Besoins de climatisation	Taux d'inconfort	Température
52 kWh/m ²	10 kWh/m ²	0	20 – 27°C

À partir des résultats thermiques, l'impact environnemental de la maison est évalué pour une durée de vie de 100 ans. Le béton est considéré recyclé en fin de vie sous forme de gravier concassé, les fenêtres, le polystyrène, le polyuréthane et les panneaux OSB sont incinérés tandis que les autres matériaux sont mis en décharge. Le chauffage et l'ECS sont alimentés par une chaudière gaz de rendement sur PCI 0,9 et la climatisation est considérée avec un EER de 3. Les déchets ménagers et le transport des occupants ne sont pas pris en compte car l'étude porte uniquement sur le bâti. Enfin, le mix électrique considéré est le mix moyen de l'année 2016 provenant du modèle présenté au chapitre 2, dont les caractéristiques sont rappelées dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Répartition des technologies au sein du mix électrique

Nucléaire	Hydraulique	Énergies renouvelables	Charbon	Gaz
76 %	11 %	8 %	1 %	4 %

Les impacts environnementaux de la maison individuelle sont présentés par année et par m² de surface habitable dans le Tableau 4-4.

Tableau 4-4 : Impacts environnementaux de la maison individuelle (Impact/m²/an)

Changement climatique (kgCO ₂ eq.)	Demande cumulative d'énergie (MJ)	Eau utilisée (m ³)	Déchets produits (kg)	Déchets radioactifs (kg)	Domage total écosystème (PDF.m ² .an)	Domage total santé humaine (DALY)
23,7	750	3,18	4,33,0	5,2E-03	5,9	3,1E-05

Nous avons montré ici la possibilité de modéliser un bâtiment sur le logiciel Rhinoceros 3D, d'utiliser l'outil Grasshopper 3D afin d'exporter le dessin dans Pleiades BIM puis d'effectuer la simulation thermique et l'analyse de cycle de vie à travers les outils respectifs Pleiades STD et Pleiades ACV.

4.3.3 Modélisation Grasshopper

Certaines fonctions de base de Grasshopper permettent de s'affranchir de la modélisation Rhino si on le souhaite, par exemple pour créer des bâtiments réguliers comme une tour ou une barre de logements. Les fonctionnalités utilisées sont présentées sur la Figure 4-8 ; un étage est d'abord créé en renseignant sa longueur, sa largeur et sa hauteur, puis il est dupliqué selon le nombre d'étages renseignés, après avoir défini l'axe Z comme vecteur de référence pour la duplication. Cette suite de composants est ensuite reliée au schéma constructif présenté dans la section précédente à la Figure 4-6 afin de créer le modèle énergétique du bâtiment en vue de l'exporter dans Pleiades BIM. Cette méthode de modélisation peut être complétée pour complexifier le bâtiment, et comporte l'avantage d'être très précise, ce qui implique une probabilité d'échec très faible lors des différentes utilisations de la maquette numérique.

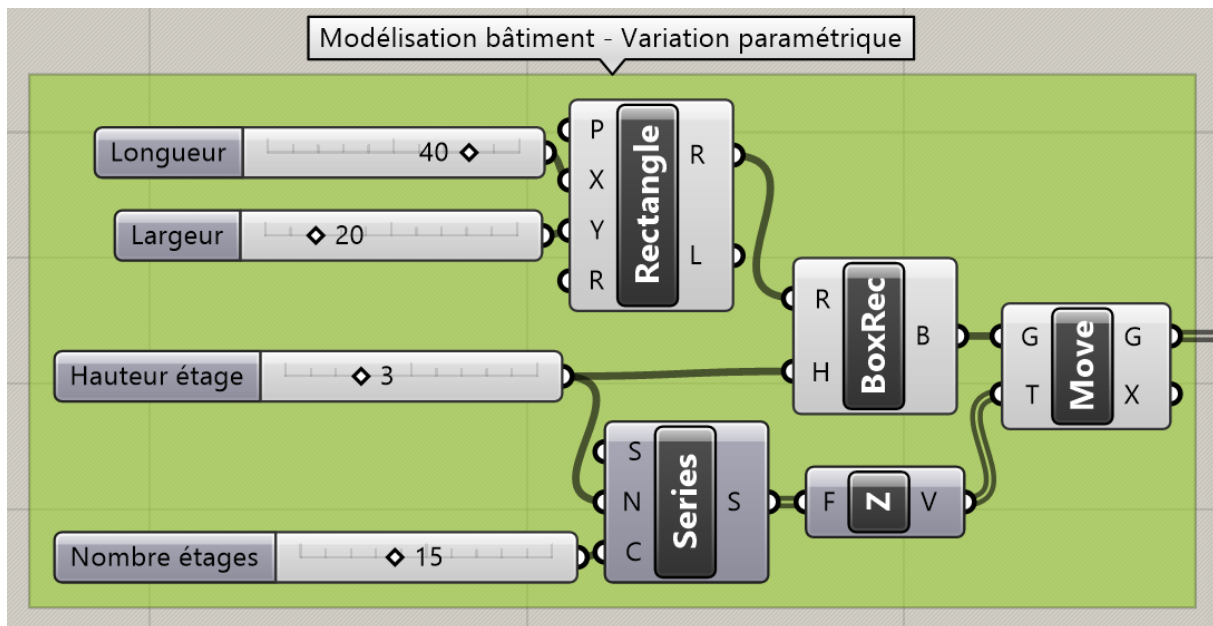


Figure 4-8 : Génération d'un bâtiment standard à partir de Grasshopper

Ce schéma illustre très bien la facilité de mettre en place la conception paramétrique sur Grasshopper ; une simple modification d'un des paramètres de forme du bâtiment, comme la longueur, la largeur ou le nombre d'étages du bâtiment crée une nouvelle variante de bâtiment et l'exporte en gbXML. Par exemple, une barre de logements de largeur 10 m, longueur 40 m et composée de 6 étages est représentée Figure 4-9 conjointement à une tour de même largeur, de longueur 30 m et comprenant 30 étages de 3 m de hauteur. Ces représentations 3D proviennent de Rhino, et ont été générées instantanément en modifiant les paramètres concernés sur le schéma de construction présenté à la Figure 4-8. Une application de la conception paramétrique comprenant deux variantes créées à partir de ce schéma constructif sera présentée au paragraphe 4.2 de ce chapitre.

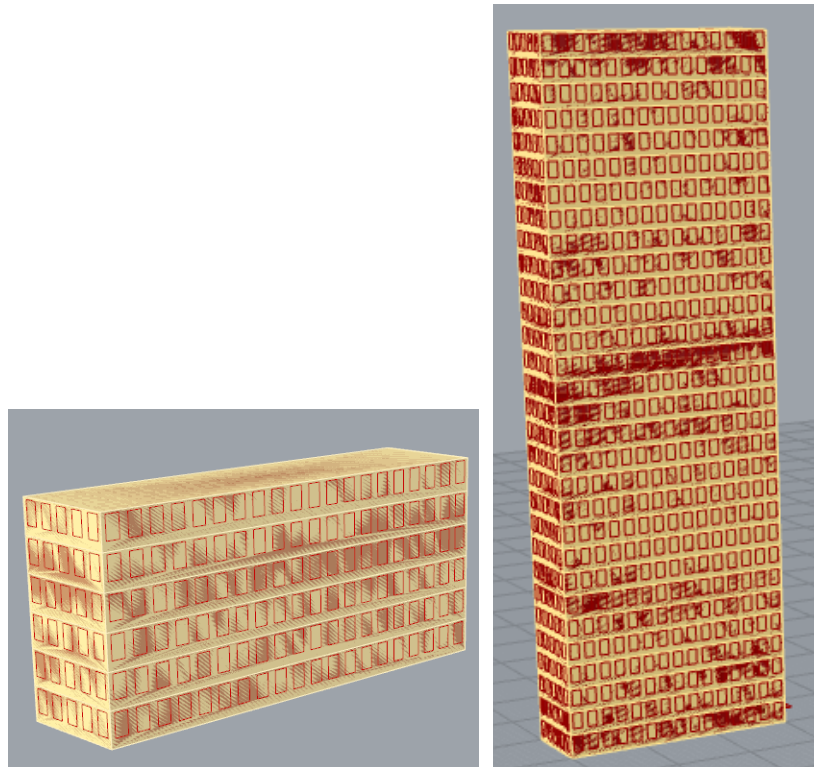


Figure 4-9 : Barre de logement (à gauche) et tour (à droite) générées à partir de Grasshopper

4.3.4 Vers l’optimisation multicritère de l’aménagement urbain

Le couplage présenté dans ce chapitre a été réalisé avec l’intermédiaire de l’outil Pleiades BIM pour importer le fichier gbXML provenant de Rhino dans Pleiades. Cependant, les nombreux développements effectués régulièrement par Izuba énergies ont conduit à une version récente permettant désormais de s’affranchir de cette étape intermédiaire, en proposant la fonctionnalité d’import des maquettes numériques dans le modelleur Pleiades. A partir du modelleur, l’ensemble des caractéristiques thermiques qui n’ont pas été renseignées dans Rhino peuvent être ajoutées afin d’effectuer une simulation thermique dynamique du bâtiment. De futurs développements sont programmés afin d’intégrer également l’ACV au modelleur, et ainsi permettre la réalisation des évaluations environnementales conjointement à la simulation thermique, permettant d’éviter une étape supplémentaire.

L’automatisation du couplage pourrait également faire l’objet de futurs développements ; ces travaux de thèse présentent une étude de faisabilité concernant le lien entre les logiciels Rhino et Pleiades, et montrent que de futurs développements seraient profitables. Les différents modules de la suite Rhinoceros 3D permettent de renseigner de nombreuses caractéristiques du modèle énergétique du bâtiment ; un premier travail consisterait à vérifier la prise en compte de ces éléments dans le fichier gbXML puis de s’assurer de la bonne transmission des données au cours de l’import dans Pleiades. Cela

engendrera un gain de temps considérable aux variations paramétriques, si la quasi-totalité des éléments sont renseignés dans Rhino avant l'export, et non dans Pleiades, auquel cas le modèle énergétique doit être retravaillé pour chaque variante. Ensuite, la future intégration de l'ACV dans le modèleur permettra de n'utiliser que deux outils, et ainsi de s'affranchir de toutes les étapes intermédiaires qui pourraient complexifier le procédé, et éventuellement être sources d'erreurs.

Enfin, ces développements pourraient permettre d'associer la conception paramétrique et l'optimisation multicritère ; la procédure d'optimisation environnementale présentée dans le troisième chapitre de cette thèse comprend des gènes décrivant l'enveloppe du bâtiment. Il serait désormais envisageable d'ajouter un gène correspondant aux variantes de forme d'un bâtiment, et ainsi d'optimiser conjointement la forme et l'enveloppe du bâtiment, en ajoutant à l'espace de décision la longueur, la largeur et la hauteur des variantes que l'on souhaite créer, en imposant les grands axes du projet, comme la surface habitable souhaitée. De plus, la flexibilité de Rhino permettra d'étendre ce développement à d'autres paramètres de forme plus spécifiques, comme un type de toit complexe par exemple.

4.4 Application de la conception paramétrique à un cas d'étude

Les développements présentés jusqu'à présent dans ce chapitre permettent l'amélioration de la prise en compte de l'impact environnemental des bâtiments à différentes échelles ; on étudie désormais leur application à des cas particuliers. Dans un premier temps on s'intéressera à l'influence du plan d'aménagement urbain sur l'impact environnemental du quartier des Lumières en prenant en compte les variations des quantités de matériaux structurels. D'autre part, on appliquera la conception paramétrique à un bâtiment de surface habitable fixe, sur une parcelle donnée, afin de déterminer l'influence des décisions de conception sur l'environnement.

4.4.1 Proposition d'aménagement urbain

Le cas d'étude du quartier des Lumières a été modifié afin d'analyser l'influence de la structure à l'échelle du quartier dans le cas d'une variation paramétrique. Deux versions du plan d'aménagement urbain ont été proposées en conservant une surface habitable de logements et une surface utile de bureaux équivalentes. La version haute est composée de tours de bureaux de 38 niveaux et de bâtiments de logements de 22 niveaux pour une emprise au sol réduite d'environ 5000 m² sur une surface totale de parcelle d'environ 25000 m², permettant plus d'espaces verts au sol mais augmentant les impacts de la structure. La version basse quant à elle comprend 11 bâtiments au total pour une emprise au sol

d'environ 11500 m², les logements sont composés de 10 étages, et les bureaux de 14 étages. Les caractéristiques des deux aménagements proposés sont résumées dans le Tableau 4-5.

Tableau 4-5 : Caractéristiques des deux propositions d'aménagement du quartier des Lumières

	Quartier version haute		Quartier version basse	
	Bureaux : 2 tours R+37	Logements : 3 tours R+21	Bureaux : 5 bâtiments R+14	Logements : 6 bâtiments R+10
Emprise au sol (m ²)	3000	1944	7500	3888
Surface de plancher (m ²)	114000	42768	112500	42768
Nombre de niveaux moyen	38	22	15	11

Le plan de la première proposition d'aménagement modélisée sur Pleiades et sa représentation 3D sont présentés Figure 4-10 et Figure 4-11 ; les tours de bureaux sont tout d'abord modélisées tandis que les logements sont considérés comme des masques, et inversement. Le plan de l'aménagement initial du quartier est également inséré à droite de la Figure 4-10 en guise de comparaison.

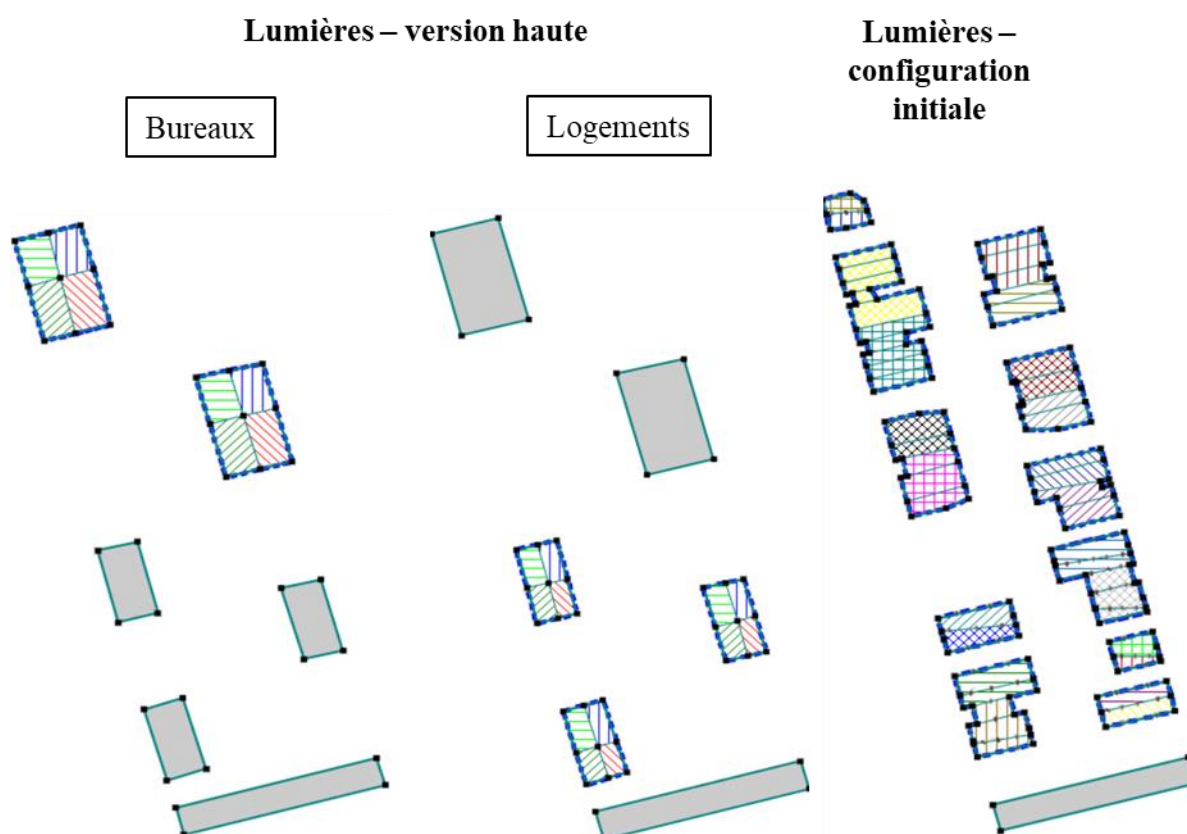


Figure 4-10 : Plan de la version haute du quartier, tours de bureaux (à gauche), tours de logements (au milieu), plan initial (à droite)

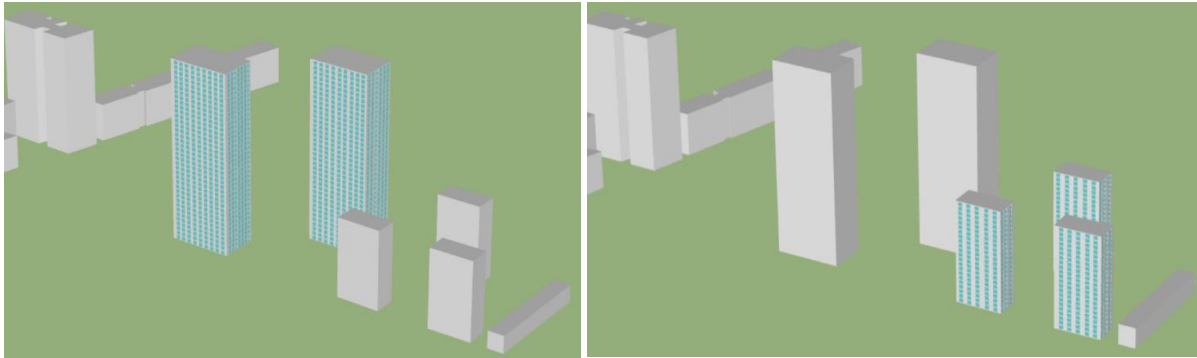


Figure 4-11 : Représentation 3D des bureaux (à gauche) et des logements (à droite) de la version haute du quartier

La version basse du quartier est illustrée sur les Figure 4-12 et Figure 4-13. Elle compte d'une part 5 bâtiments de bureaux, et d'autre part 6 bâtiments de logements ; le plan initial est également retranscrit à titre de comparaison.

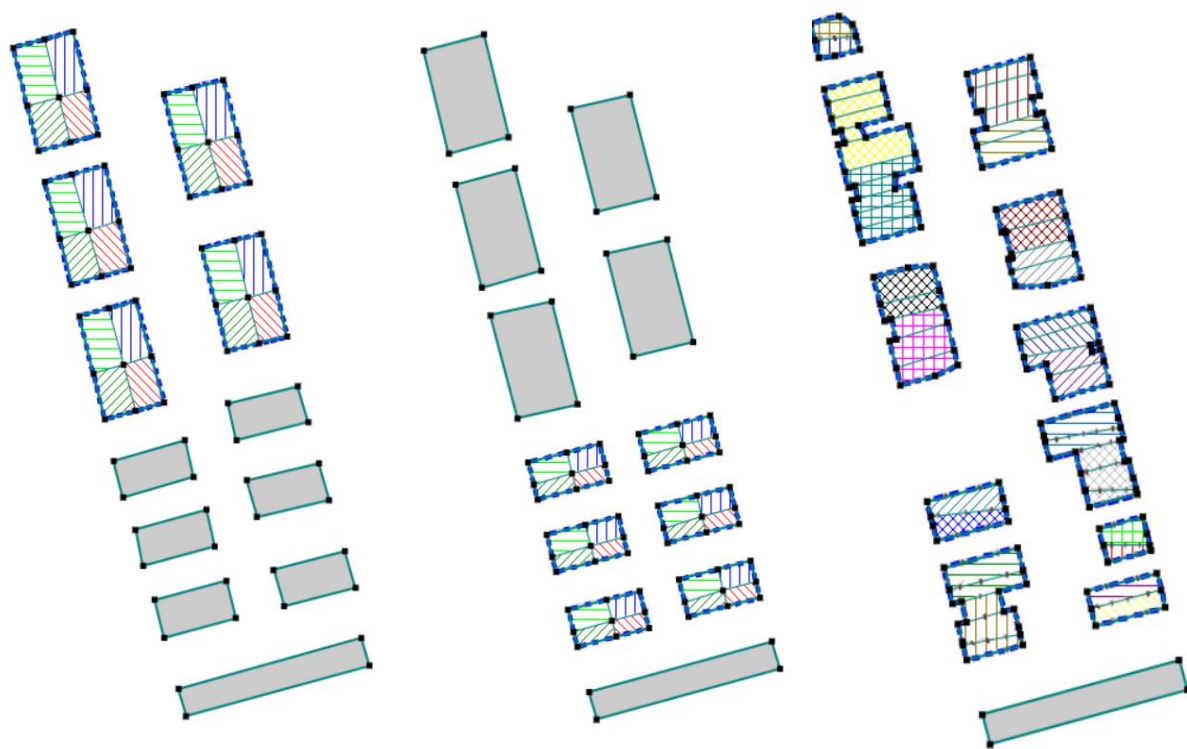


Figure 4-12 : Bâtiments de bureaux (à gauche) et de logements (au milieu) de la version basse du quartier, et plan initial (à droite)

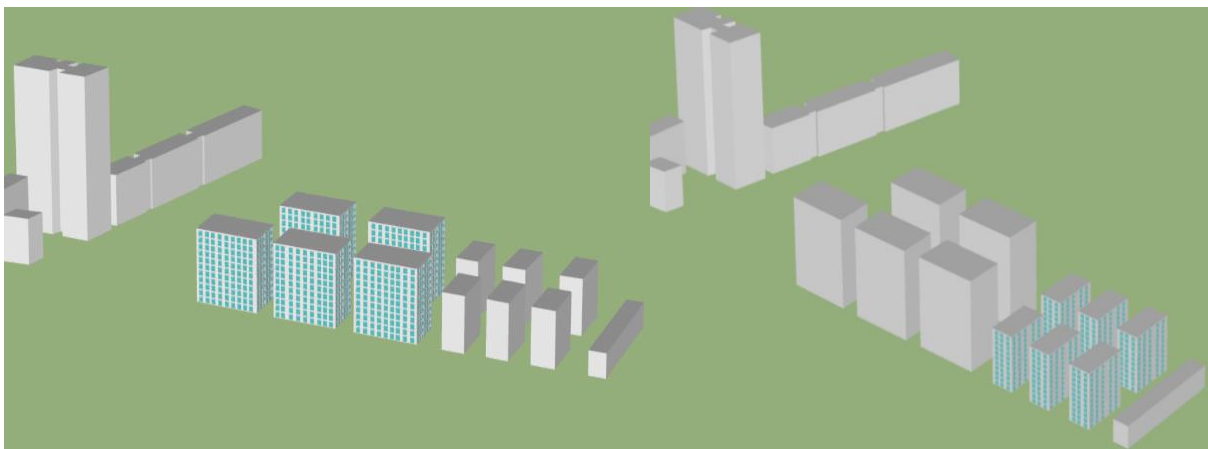


Figure 4-13 : Représentation 3D des bureaux (à gauche) et des logements (à droite) de la version basse du quartier

Les simulations thermiques des deux propositions d'aménagement du quartier ont été effectuées afin de déterminer les besoins de chauffage et de climatisation annuels. Les caractéristiques thermiques des bâtiments du quartier des Lumières ont été présentées au chapitre 2, ainsi que les hypothèses pour l'ACV. Le réseau de chaleur, alimenté à 54 % par une chaufferie bois et à 46 % par une chaudière à gaz, est implémenté pour la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire, et le mix électrique de l'année 2018 fourni par RTE a été sélectionné ; ce dernier est composé en moyenne sur l'année à 72 %

Chapitre 4. Conception paramétrique

d'électricité nucléaire, 21 % de renouvelables, 3 % de charbon et 4 % de gaz. La Figure 4-14 présente les résultats de la simulation des bureaux et des logements. On observe une baisse de 13 % des besoins de chauffage dans les logements de la version haute du quartier par rapport à la version basse. Ceci s'explique principalement par la diminution des masques solaires due à l'espacement entre les bâtiments et éventuellement par une augmentation de la compacité du bâtiment lors de l'ajout d'étages supplémentaires (surfaces de toiture et de planchers bas réduite). Le cas des bureaux ne nécessitant que très peu de chauffage, la version haute d'aménagement du quartier des Lumières permet quasiment de supprimer les besoins chauds. Cependant, un bâtiment avec beaucoup d'apports solaires est efficace en hiver, mais voit ses besoins froids augmenter en été ; ainsi les besoins de climatisation des tours de bureaux sont plus élevés dans la version haute du quartier ; l'augmentation du débit de sur-ventilation nocturne pourrait contribuer à réduire ces besoins. Les logements n'ont pas de système de climatisation dans ce cas d'étude.

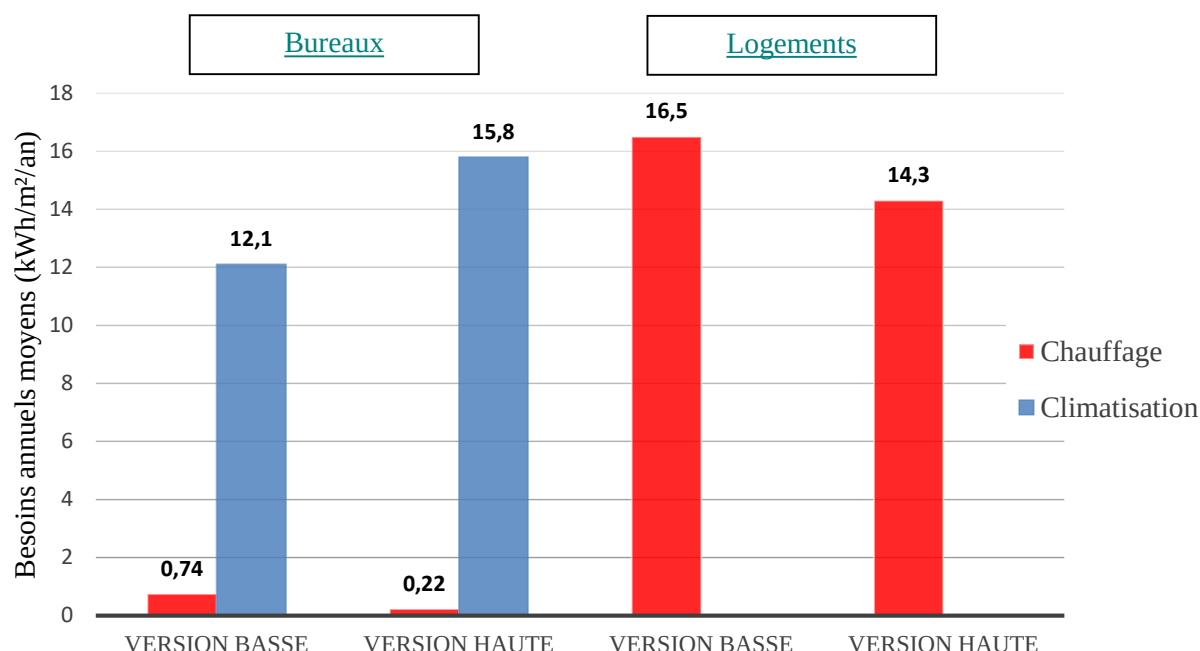


Figure 4-14 : Besoins moyens de chauffage et de climatisation des deux versions du quartier

La forme des bâtiments influence donc les consommations énergétiques du quartier et l'évaluation environnementale sur le cycle de vie, qui comprend l'étape d'utilisation des bâtiments mais aussi leur structure. L'analyse de cycle de vie des deux versions du quartier a été effectuée pour une durée de vie de 80 ans, elle met en évidence Figure 4-15 la différence d'impacts qui est notable sur les dommages à la santé. La version basse nécessite peu de matériaux structurels en comparaison avec la version haute du quartier, car la structure a besoin d'être particulièrement renforcée dans les bâtiments comprenant plus de 30 étages, ce qui est le cas des bâtiments de bureaux. Concernant l'émission des gaz à effet de serre, l'augmentation des besoins de chauffage de la version basse compense en partie le gain provenant de la faible quantité de béton et d'acier dans la structure par rapport à la version haute ; cela explique

que l'écart entre les deux variantes du quartier est seulement de 6 % concernant l'indicateur du changement climatique. L'écart entre les dommages à la santé des deux versions est légèrement plus important, il s'élève à 10 %.

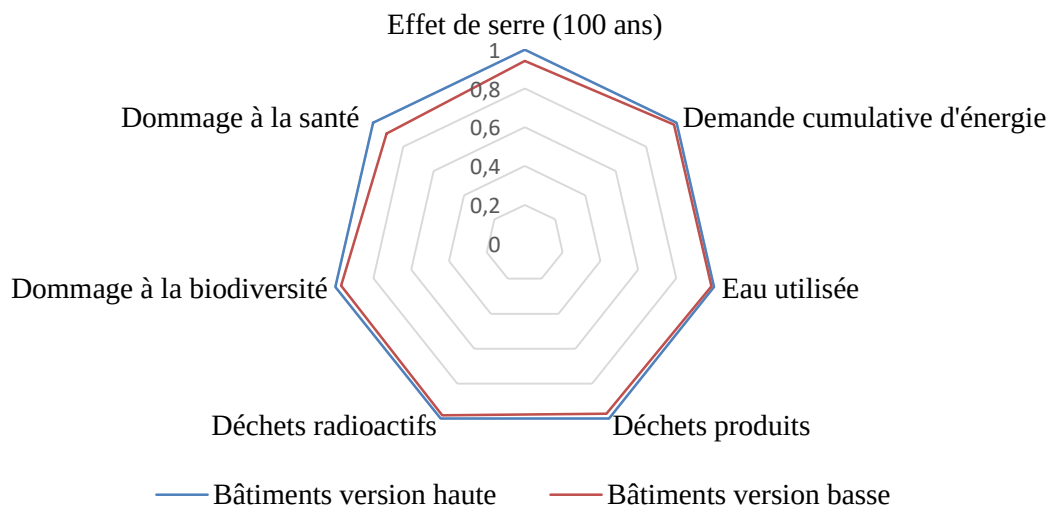


Figure 4-15 : Comparaison des impacts environnementaux des bâtiments des deux versions du quartier

La répartition des différents postes d'émissions de gaz à effet de serre est représentée Figure 4-16. On remarque alors que l'étape d'utilisation des bâtiments est majoritaire sur le changement climatique ; elle comprend le chauffage des bâtiments, la climatisation des bureaux, la consommation d'électricité spécifique et la consommation d'eau, naturellement plus élevée dans les logements que dans les bureaux. La composition de l'enveloppe de l'ensemble des bâtiments étudiés est identique, ainsi que les éléments de second œuvre, pour lesquels les équipements sanitaires et électriques ont été différenciés du lot architectural. Enfin, la structure correspond aux quantités de béton et d'acier nécessaires, calculées à partir de l'outil de pré-dimensionnement décrit précédemment. Les postes présentant des différences d'émissions de GES entre les deux versions étudiées sont le chauffage et la structure ; nous avons montré lors de la simulation thermique que les besoins de chauffage des bureaux sont presque nuls, ainsi le seul poste responsable de la variation des impacts sur le changement climatique correspond aux éléments structurels ; l'impact de la structure est donc non négligeable sur cet indicateur, elle doit être prise en compte lors de l'évaluation environnement des variantes paramétriques. Les besoins froids sont plus élevés dans la version haute du quartier, cependant la climatisation provient du mix électrique français majoritairement alimenté d'électricité nucléaire, dont les impacts sur le changement climatique sont très faibles, les deux propositions d'aménagement ne sont donc pas majoritairement impactées par ce poste de consommation concernant les émissions de GES. Cependant, la demande cumulative d'énergie et la quantité produite de déchets radioactifs sont impactés par l'augmentation des besoins froids.

Les bâtiments de logements comprennent 22 étages, ils sont donc de plus faible hauteur que les bureaux dans la version haute du quartier ; étant donné que les impacts de la structure augmentent

particulièrement à partir d'une trentaine d'étages, la quantité de GES relative aux deux propositions d'aménagement n'est pas considérablement différente. Les consommations relatives au chauffage augmentent dans la version basse du quartier, et on peut conclure que les différents postes d'émissions de GES se compensent pour les bâtiments de logements, qui émettent environ 18,5 kgCO₂eq./m²/an, dans les deux versions étudiées.

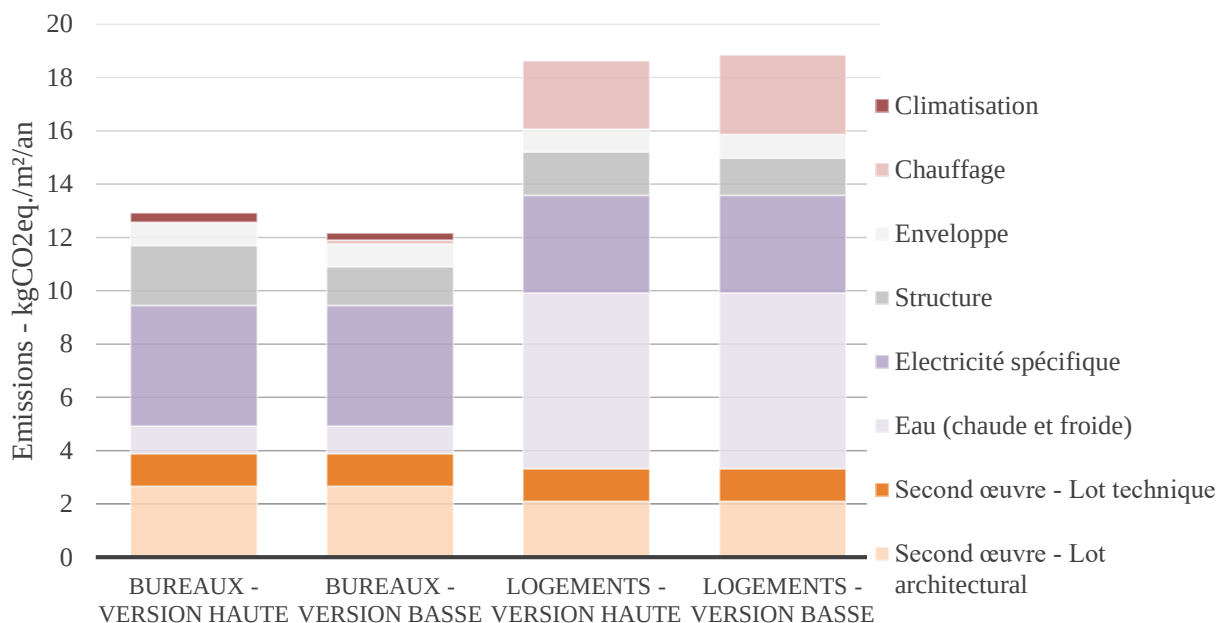


Figure 4-16 : Répartition des postes d'émissions de GES dans les logements et bureaux dans les deux propositions de plan d'aménagement urbain

4.4.2 Enjeux liés à la densification des territoires

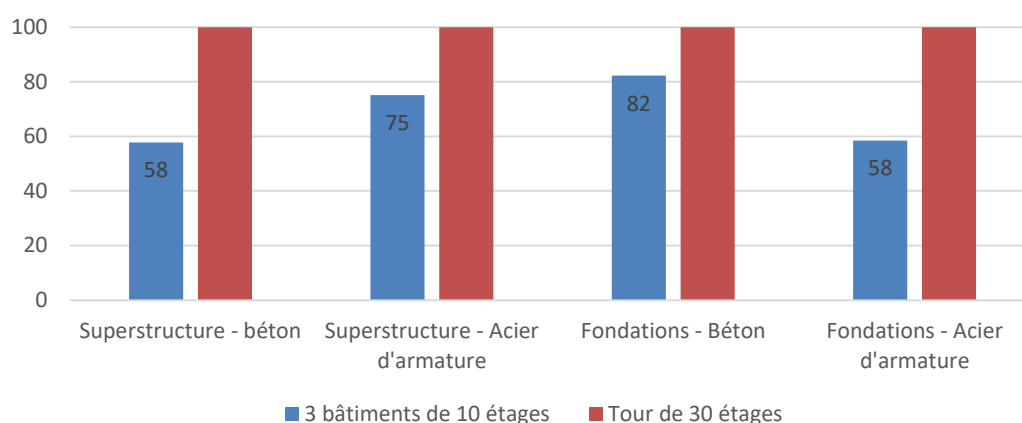
Une deuxième application de la conception paramétrique a ensuite été réalisée à l'échelle d'un sous-ensemble de bâtiments ; il s'agit d'établir l'influence de la hauteur des immeubles de bureaux sur les impacts environnementaux associés, en comparant une tour de 30 étages et trois bâtiments de 10 étages, les deux variantes ayant une surface utile totale identique. Les performances thermiques et environnementales sont analysées en prenant en compte les impacts liés à la structure afin de comparer les deux variantes dans leur globalité. Le cas d'étude ne contient pas de parking en sous-sol, on ne prendra en compte que les fondations et la superstructure.

Le bâtiment a été modélisé à partir des algorithmes visuels de Grasshopper afin de faciliter l'export par l'outil BIM. Les caractéristiques de conception sont identiques pour les deux variantes, seul le nombre d'étages diffère. Ces dernières sont présentées dans le Tableau 4-6.

Tableau 4-6 : Caractéristiques de conception des variantes de bâtiments

	Nombre d'étages	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur sous dalle (m)	Ratio surfaces vitrées	Surface totale (m ²)
Tour de bureaux	30	40	20	3	0,4	24000
Trois bâtiments de 10 étages	10					

Ce cas d'étude a volontairement été défini comme générique afin de montrer la faisabilité du couplage. Le pré-dimensionnement de la structure indique que la tour de 30 étages nécessite entre 18 et 42 % de plus de matériaux que les 3 bâtiments de 10 étages assemblés, selon les matériaux et les postes concernés (fondations et superstructure). En effet, plus le nombre d'étages augmente, plus la quantité de béton et d'acier (dans le cas des structures béton) par m² de surface utile augmente. Les proportions sont présentées Figure 4-17, mettant en relation les quantités de matériaux nécessaires pour la tour de 30 étages et pour la conception des trois bâtiments de 10 étages, regroupés dans l'histogramme suivant. Du béton armé est utilisé dans la superstructure et dans les fondations ; les quantités de béton et d'acier d'armature sont donc réparties entre ces deux éléments structurels.

**Figure 4-17 : Quantités relatives de béton et d'acier des éléments structurels (d'après Mendes, 2022)**

La visualisation 3D est disponible sur Rhino lors de la création des bâtiments avec Grasshopper. Le modèle de bâtiment est transcrit en format gbXML, puis importé par Pleiades BIM. La représentation 3D y est également disponible. Ces deux illustrations sont présentées sur la Figure 4-18 pour la tour de bureaux, et sur la Figure 4-19 pour les trois bâtiments.

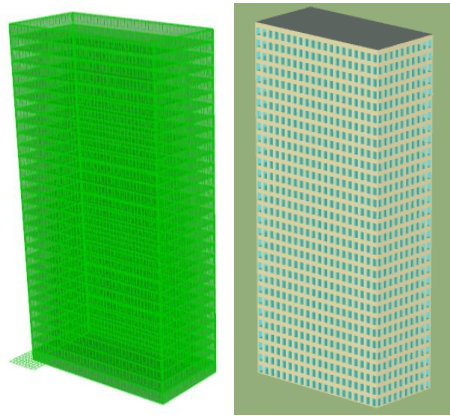


Figure 4-18 : Représentation 3D de la tour de bureaux depuis Rhino (à gauche) et Pleiades (à droite)

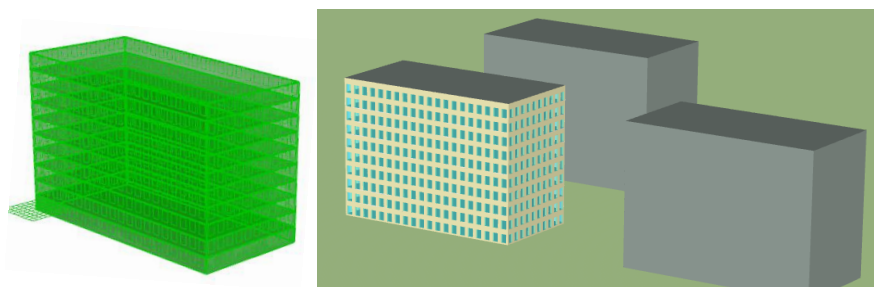


Figure 4-19 : Représentation 3D des petits bâtiments de bureaux depuis Rhino (à gauche) et Pleiades (à droite)

Les caractéristiques thermiques ont été choisies afin de considérer un bâtiment performant, il s'agit des hypothèses relatives au cas d'étude, le quartier des Lumières. Chaque paroi, toiture et plancher contient 15 cm d'isolant, et du double vitrage basse émissivité est installé. La tour est considérée sans masques proches tandis que les trois bâtiments constituent mutuellement des masques proches comme illustré à droite de la Figure 4-19, car une même parcelle est considérée pour les deux variantes. C'est également pour cette raison que seuls les impacts liés au bâti sont pris en compte, l'ajout des impacts liés au transport quotidien des occupants serait inutile dans le cadre d'une comparaison environnementale car ils sont identiques dans les deux cas, la tour et le groupement de bâtiments hébergeant le même nombre de travailleurs et étant situés au même endroit.

La simulation thermique dynamique indique un besoin annuel de chauffage de moins de 1 kWh/m² et un besoin de climatisation annuel d'environ 15 kWh/m², pour une occupation des bureaux de 9h à 18h en semaine. Les besoins de chauffage de la tour sont inférieurs aux bâtiments de 10 étages, mais ces derniers sont si faibles que l'impact environnemental associé est négligeable. Les besoins froids quant à eux sont plus élevés dans la tour que dans les trois bâtiments de 10 étages, les masques solaires créés par les petits bâtiments les uns par rapport aux autres diminuant les apports solaires. Cette différence de besoin froids entre les deux variantes s'élève à 10 %.

4.4.2.1 Influence de la structure

Les deux variantes de bâtiments ont les mêmes quantités de matériaux par m² de surface utile exceptés les matériaux structurels, la toiture et le plancher bas ; l'augmentation des impacts environnementaux de l'étape de construction présentée Figure 4-20 provient essentiellement de la structure. La construction de trois bâtiments de 10 étages nécessite moins de béton et d'acier dédiés aux fondations et à la superstructure du bâtiment que la construction d'une tour de 30 étages.

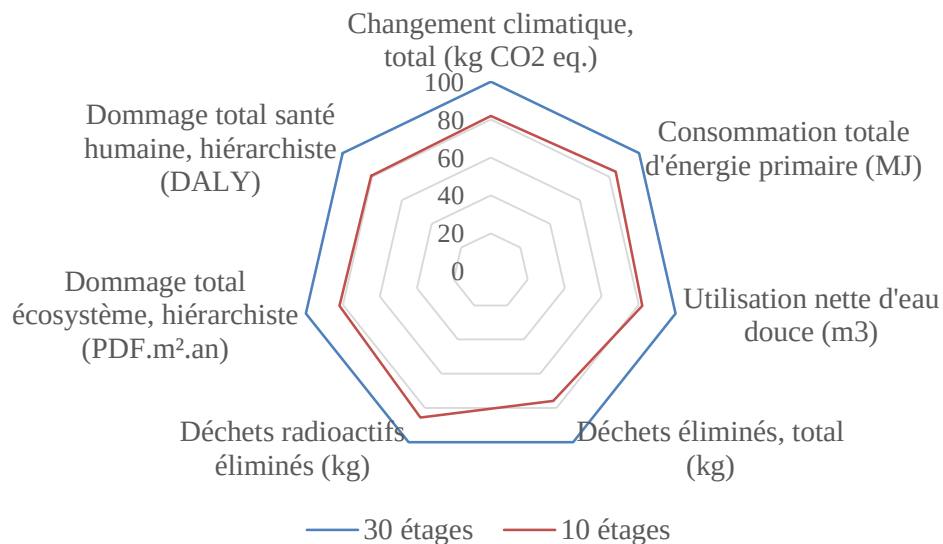


Figure 4-20 : Comparaison environnementale des deux variantes sur l'étape de construction

Les impacts sur le changement climatique, l'utilisation d'eau et les dommages à la santé et à la biodiversité sont environ 20 % plus faibles pour les trois bâtiments que pour la tour. L'écart est légèrement plus faible (15 %) pour les indicateurs de consommation d'énergie et de déchets radioactifs car la demande d'énergie primaire nécessaire à la fabrication des fenêtres et des équipements est élevée ainsi que la production de déchets radioactifs associée ; la part de l'impact attribuée aux éléments structurels est donc plus faible concernant ces deux indicateurs. L'écart se creuse cependant pour les déchets éliminés ; les quantités de béton et d'acier de la structure de la tour sont plus élevées que celles des trois bâtiments de 10 étages, or la fabrication de l'acier est responsable d'une proportion importante de la quantité de déchets produits ; la part des autres postes de la construction est donc réduite. Les trois bâtiments éliminent 24 % moins de déchets en masse que la tour de 30 étages.

4.4.2.2 Comparaison environnementale sur l'ensemble du cycle de vie

Les impacts environnementaux de l'étape d'utilisation des deux variantes de bâtiments sont majoritaires par rapport aux autres étapes du cycle de vie, pour une durée de vie fixée à 100 ans pour cette comparaison. Ainsi, bien que la tour génère environ 20 % plus d'impacts sur les différents indicateurs lors de l'étape de construction, l'évaluation environnementale des deux variantes de bâtiment

Chapitre 4. Conception paramétrique

sur l'ensemble de leur cycle de vie est similaire. Le graphique radar présenté à la Figure 4-21 montre que des effets de compensation sont présents et que les différences notées précédemment entre les deux variantes ne sont plus aussi frappantes.

L'importante quantité des matériaux structuraux nécessaires à la construction de la tour de 30 étages se compense en partie par les impacts de la toiture et du plancher bas qui sont, en ce qui concerne les matériaux de construction, multipliés par le nombre de bâtiments dans la seconde variante. Les planchers intermédiaires séparant les étages ne sont pas isolés et ont un impact inférieur à celui des parois horizontales extérieures. De plus, les besoins de chauffage sont plus élevés dans le cas des 3 bâtiments, du fait des masques solaires induits par les autres bâtiments, et des déperditions par le plancher et la toiture qui sont multipliées par le nombre de bâtiments.

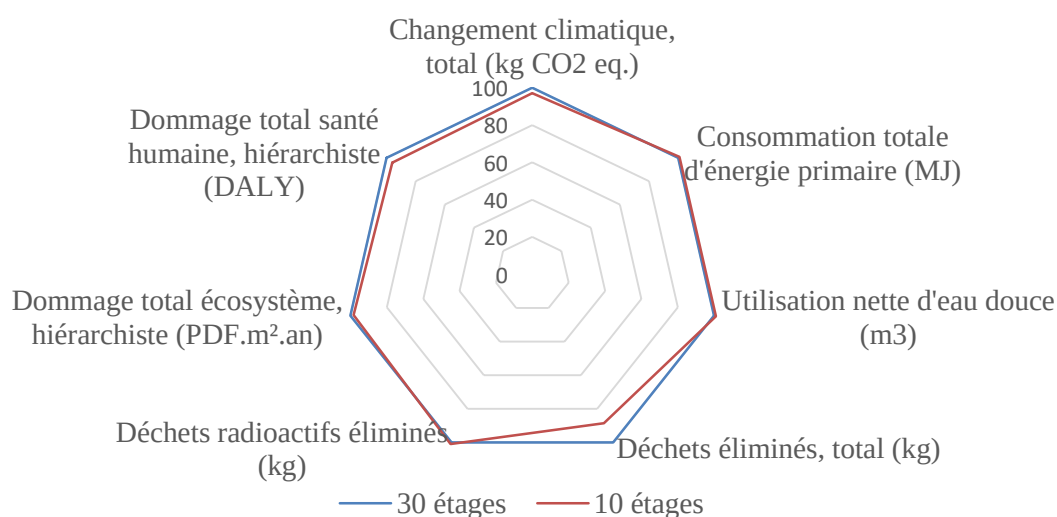


Figure 4-21 : Comparaison environnementale globale des deux variantes de bâtiments

La quantité de déchets éliminés provient en majorité des étapes de construction et d'utilisation, la répartition des différentes étapes du cycle de vie est présentée sur la Figure 4-22. La consommation d'eau des occupants du bâtiment et d'électricité spécifique sont responsables de la majorité de la production de déchets de l'étape d'utilisation, or les scénarios considérés pour ces deux postes de consommation sont définis en fonction du nombre d'occupants ; les deux variantes de bâtiments produisent alors une quantité similaire de déchets. Cependant, la part de l'étape d'utilisation varie car la quantité de déchets produits lors de la construction des deux variantes est différente ; comme on a pu le préciser précédemment, la fabrication de l'acier crée une quantité importante de déchets. Étant donné que la tour nécessite plus d'éléments structuraux que les trois bâtiments de 10 étages, notamment d'acier, les déchets de construction de la tour de 30 étages sont élevés. C'est pourquoi les déchets produits par les bâtiments de 10 étages proviennent à 45 % de l'étape de construction et à 48 % de l'étape d'utilisation, tandis que ceux de la tour proviennent à 52 % de l'étape de construction et seulement à 42 % de l'étape d'utilisation. La rénovation du bâtiment ne concerne pas la structure, les planchers et

les toitures, les impacts sont donc égaux entre les variantes. Enfin, le béton et l'acier sont valorisés en fin de vie, l'acier est réutilisé et le béton est recyclé en gravier concassé, ainsi ces matériaux ne produisent que très peu de déchets en fin de vie du bâtiment. Cependant, les impacts relatifs à la fin de vie du plancher bas et de la toiture sont environ trois fois plus élevés dans la variante de trois bâtiments que dans la tour, ce qui justifie la légère augmentation de l'étape de fin de vie visible sur la Figure 4-22 pour les bâtiments de 10 étages. Toutefois cette augmentation est faible car les autres éléments du bâtiment comme les façades et les fenêtres ne sont pas modifiés entre les deux variantes.

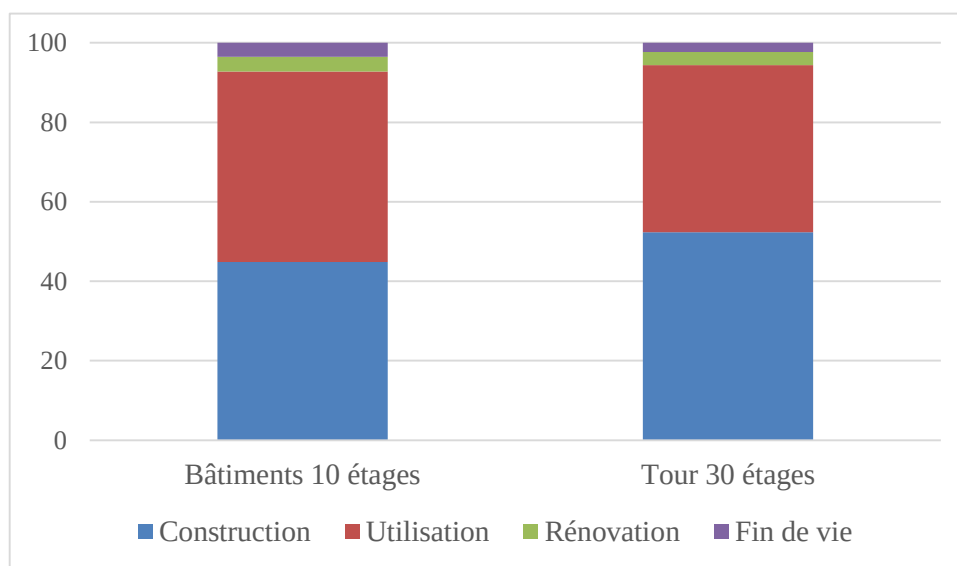


Figure 4-22 : Répartition des étapes responsables de la production de déchets

Cette étude a permis d'évaluer l'influence du nombre d'étages sur les impacts environnementaux d'un bâtiment. On en conclut que la tour de 30 étages émet globalement plus d'impacts, mais que la variation est très faible ; en effet, la quantité de matériaux structurels augmente considérablement au-delà de 30 étages, mais jusqu'à cette hauteur la différence d'impact n'est pas significative.

L'étude s'est limitée au bâti, les impacts environnementaux créés par les transports et les déchets ménagers n'ont pas été pris en compte car la surface habitable est identique et les bâtiments sont situés sur la même parcelle, très bien desservie par les transports en commun, cela n'affecterait donc pas la gestion des déchets et des transports. Cependant, cette étude engendre des questionnements à plus grande échelle, faisant intervenir d'autres domaines de travail, comme la valorisation de l'espace disponible au sol pour intégrer de la nature en ville, dont le but principal serait de limiter les effets d'îlot de chaleur en été. L'évaluation environnementale pourrait être complétée par l'intégration des matériaux et de la consommation énergétique liés aux ascenseurs, ou encore à la surface disponible pour installer une production d'énergie (panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques). Les impacts de l'alimentation pourraient également être pris en compte, les bâtiments de 10 étages permettant le développement de l'agriculture urbaine sur leur toiture. L'emprise au sol des 3 bâtiments, plus élevée que celle de la tour,

engendre un impact sur l'occupation des sols, pris en compte dans les dommages à la biodiversité. Toutefois, cette emprise au sol joue un faible rôle sur le total des impacts environnementaux.

L'adaptation du mix électrique permettrait également d'améliorer l'évaluation environnementale. En effet, le mix moyen annuel recense les technologies de production d'électricité utilisées au cours de l'année et calcule les impacts environnementaux correspondants. Un mix dynamique permettrait de prendre en compte l'évolution de l'utilisation des technologies heure par heure et donc de s'approcher des impacts réels. L'ACV attributionnelle considère un mix moyen, qui pourrait être remplacé par un mix marginal dans le cas de l'ACV conséquentielle. Dans ce cas, ce sont les conséquences du choix de conception qui seront évaluées : la demande d'énergie supplémentaire induite par le bâtiment, qui nécessitera de faire fonctionner un moyen de production disponible, ou au contraire la production d'électricité à travers le système photovoltaïque qui réduira la demande sur le réseau et évitera une production correspondant au mix marginal. Enfin, le mix évolue au cours du temps, il serait intéressant d'intégrer les scénarios prospectifs d'évolution du mix pour évaluer les étapes d'utilisation, de rénovation et de fin de vie qui vont se dérouler au cours des 100 prochaines années (Frapin et al., 2022).

4.5 Conclusion du chapitre

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté des outils adaptés à la problématique qui décrit l'impératif d'agir en phase amont pour réduire les impacts environnementaux et donc nécessite que les acteurs concernés aient la possibilité de travailler avec des outils d'aide à la conception à la fois fiables et adaptés aux pratiques professionnelles. La chaîne logicielle Pleiades répond à ce cahier des charges, en intégrant un outil de simulation thermique validé par comparaison à d'autres outils de référence et à des mesures (Munaretto, 2014) et un outil d'analyse de cycle de vie des bâtiments lui aussi ayant donné lieu à diverses comparaisons internationales (Peuportier et al., 2004 ; Frischknecht et al., 2020). C'est ainsi que le couplage entre Rhinoceros 3D et Pleiades peut être considéré comme prometteur pour répondre aux enjeux climatiques actuels et urgents. De plus, la prise en compte des impacts liés à la structure permet d'affiner l'évaluation environnementale des bâtiments afin de fournir une aide à la décision plus complète et adéquate aux enjeux des projets de conception.

Les développements présentés permettent de lier la conception paramétrique et l'évaluation environnementale. Une première application de la conception paramétrique au plan d'aménagement urbain a montré l'influence non négligeable de la structure, particulièrement concernant les immeubles de bureaux de grande hauteur. La deuxième étude de cas a montré la faisabilité du couplage entre un logiciel de conception dédié aux architectes et aux concepteurs et un outil de simulation thermique et d'évaluation environnementale des bâtiments dans un cas concret, en étudiant l'influence d'un paramètre de forme comme le nombre d'étages. Il s'agit de sensibiliser les architectes et urbanistes aux

conséquences de leurs choix de conception sur les impacts induits par leurs projets. Il serait possible d'automatiser le processus pour permettre la création de nombreuses variantes et ainsi faciliter l'accès aux résultats thermiques et environnementaux. L'outil pourra alors être utilisé en phase amont de conception des projets d'aménagement urbain.

L'étude de cas présentée au paragraphe 4.4.2 est cependant très spécifique, et ne peut pas à elle seule répondre à la question : « Faut-il densifier les villes ? ». En effet, seules deux variantes ont été comparées dans un souci de simplification étant donné que l'automatisation du couplage n'est pas encore disponible, et ces deux variantes comprennent des bâtiments de 10 à 30 étages, ce qui correspond tout de même à une ville dense. De plus, de nombreux aspects doivent être pris en compte pour étudier les potentiels bénéfices de l'étalement urbain, comme la réduction des effets de chaleur par l'augmentation des espaces verts en ville ou le développement local de certaines espèces, tout en considérant le développement des infrastructures de transports en commun et la potentielle augmentation de l'utilisation de la voiture dans le cas d'une péri-urbanisation. L'objectif de ce travail est principalement d'intégrer un nouvel aspect, la structure, à l'évaluation environnementale des projets et de développer la conception paramétrique pour faciliter l'aide à la décision dès la phase amont.

Les perspectives relatives à ce travail sont nombreuses ; tout d'abord les fonctionnalités disponibles à travers les outils Ladybug mériteraient d'être explorées afin de compléter le couplage développé. Le plug in Dragonfly permettrait notamment d'étendre l'outil à l'échelle du quartier, par la simulation des infrastructures et des îlots de chaleur, tout en effectuant la simulation thermique et l'analyse de cycle de vie à l'aide des moteurs de calcul COMFIE et EQUER. L'intégration des espaces verts dans les études paramétriques serait un levier pour l'étude environnementale des bâtiments à l'échelle du quartier et de la ville. D'autre part, le réseau de chaleur était imposé par l'aménageur dans le cas du quartier des Lumières, il n'a donc pas fait l'objet de cette étude, mais le choix de la production de chaleur influence fortement les impacts des bâtiments d'un quartier ; l'intégration de ce choix à la conception paramétrique aurait donc tout son intérêt.

De plus, l'impact de l'emprise au sol des bâtiments est pris en compte dans l'indicateur des dommages à la biodiversité, à travers un indicateur intermédiaire d'occupation des sols ; cependant la différence d'impact entre la tour et les trois bâtiments de 10 étages est très faible. Ce sujet mériterait une analyse spécifique afin de connaître en détail la méthode de caractérisation de cet indicateur pour ainsi étudier de manière détaillée l'effet de la densification des villes. Dans ce cas, d'autres aspects cités précédemment, étendant l'échelle à d'autres secteurs devront être pris en compte.

Enfin, certains aspects intrinsèques au nombre d'étages des bâtiments, mentionnés en conclusion de l'étude de cas, comme l'influence de l'utilisation des ascenseurs et des quantités de matériaux nécessaires à leur construction, l'implémentation de panneaux photovoltaïques en toiture ou encore la production agricole sur les toits des bâtiments de 10 étages seront étudiés dans le cinquième chapitre.

5 Méthodologie multicritère d'aide à la décision à l'échelle du quartier

Ce chapitre a pour objet l'application des outils décrits précédemment à une étude de cas en abordant des aspects supplémentaires qui n'avaient pas été intégrés dans les chapitres précédents. Il s'agit tout d'abord des aspects énergétiques, en particulier la comparaison entre la production de chaleur par un chauffage urbain et une pompe à chaleur, et la prise en compte de l'évolution dans le temps du mix de production d'électricité. Un autre aspect important est l'étude de la sensibilité des résultats aux paramètres comportementaux. Ces paramètres, liés aux comportements mais aussi aux modes de vie des habitants, concernent des domaines divers outre les aspects énergétiques : la gestion des déchets, les consommations d'eau, le choix du mode de transport, et les régimes alimentaires. La prise en compte des ascenseurs et d'une installation photovoltaïque a été également intégrée dans cette étude de cas.

5.1 Aspects liés à l'énergie

Le secteur du bâtiment représente 55 % de la consommation d'électricité mondiale, et la demande inhérente peut s'avérer très élevée lors des pics journaliers de consommations (United Nations et al., 2019). La gestion du système énergétique est un défi pour de nombreux pays, avec des échanges internationaux parfois complexes, tandis que les pays ont des politiques divergentes ; les technologies utilisées pour la production d'électricité varient d'un pays à l'autre. De plus, l'évolution constante de la demande (journalière, saisonnière) ainsi que la dépendance de certaines technologies aux conditions météorologiques (photovoltaïque, éolien) nécessite une gestion dynamique du mix énergétique. Le mix est en constante évolution, afin de répondre aux différents enjeux du pays, notamment l'électrification du secteur du bâtiment de par les politiques de transition énergétique. Ce phénomène impliquera un effet à court terme en augmentant la demande de pointe (par exemple en remplaçant les chaudières gaz par des pompes à chaleur), et à long terme car le parc de bâtiment, si la rénovation thermique ne progresse pas notablement, nécessitera une plus grande capacité de production d'électricité.

Les variations journalières et saisonnières du mix imposent une modélisation dynamique afin d'évaluer les impacts environnementaux associés à la consommation électrique du pays. De plus, des scénarios prospectifs doivent être considérés pour intégrer les variations à long terme. En outre, le mix dépend de l'approche d'ACV sélectionnée ; l'approche attributionnelle reflète les impacts de procédés moyens, tandis que l'approche conséquentielle considère les technologies marginales. L'étude de l'influence du mix électrique et de la consommation énergétique sur les impacts environnementaux met en évidence les incertitudes de l'ACV des bâtiments, provenant notamment de l'évolution du futur système énergétique et des contextes méthodologiques (attributionnel, conséquentiel).

Dans cette partie nous discuterons tout d'abord des enjeux liés aux choix de modélisation des systèmes de production de chaleur, puis nous étudierons l'influence du choix de la temporalité et de l'approche du mix électrique, afin d'informer les acteurs et ainsi d'améliorer l'aide à la décision.

5.1.1 Optimisation des systèmes de production de chaleur

L'optimisation environnementale multicritère présentée au chapitre 3 de cette thèse a mis en évidence l'intérêt de réaliser une optimisation lors du choix de l'enveloppe du bâtiment, tant sur l'aspect économique qu'environnemental. Cependant, nous avons également soulevé qu'une grande partie des impacts environnementaux du bâtiment provient de son étape d'exploitation, responsable de la majorité des consommations énergétiques. Les hypothèses relatives au cas d'étude du quartier des Lumières dont les résultats ont été présentés précédemment impliquaient que seuls les besoins de chauffage et de climatisation étaient pris en compte dans l'optimisation ; les gènes décrivant la composition des parois

et les caractéristiques des fenêtres, les autres postes de consommation tels que la production d'eau chaude sanitaire, la consommation d'eau froide, d'électricité spécifique et auxiliaire ne sont pas impactés par les décisions résultant de l'optimisation. Afin d'élargir le champ de l'étude, nous introduisons une pompe à chaleur (PAC) comme alternative au réseau de chaleur, dédiée à la production du chauffage et de l'eau chaude sanitaire.

5.1.1.1 Évolution du coefficient de performance

La pompe à chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'une source froide vers un milieu plus chaud. Il existe de nombreux systèmes utilisant différentes sources d'énergie, nous proposerons l'implémentation d'une pompe à chaleur air/eau, transférant l'énergie thermique de l'air extérieur à un circuit d'eau. Elle fonctionne par l'intermédiaire d'un compresseur électrique ce qui permet de réduire considérablement les consommations énergétiques, le coefficient de performance (COP) étant largement supérieur à 1 ; un coefficient de performance annuel égal à 3 implique que les consommations énergétiques sont diminuées d'un facteur 3 par rapport aux besoins. Cependant, ce coefficient est dépendant de la température extérieure, l'efficacité du système diminue avec l'écart entre les températures extérieures et celle des émetteurs. Ceci démontre les limites de la pompe à chaleur : ce dispositif est très efficace pour réduire les consommations d'énergie lorsque les écarts de température sont faibles, mais il l'est moins lorsque les températures extérieures sont plus basses, ce qui correspond à une forte demande.

Afin de prendre en compte la dépendance temporelle et météorologique des consommations énergétiques, un mix électrique horaire est considéré et le COP de la PAC est également recalculé heure par heure ; ainsi les variations de performance du système sont modélisées. Le calcul est basé sur l'efficacité énergétique d'un cycle de Carnot. Ce cycle théorique est considéré comme parfait, le calcul de son efficacité est détaillé ci-après. Le deuxième principe de la thermodynamique permet d'établir l'égalité de Clausius-Carnot (1) dans le cas d'une transformation réversible, avec Q_f et Q_c le transfert thermique respectif avec la source froide et la source chaude, et T_f et T_c respectivement la température de la source froide et de la source chaude. L'efficacité énergétique est par définition le rapport entre l'énergie utile en sortie et l'énergie fournie en entrée. Pour un cycle de Carnot il s'agit du rapport entre l'énergie apportée par la source chaude Q_c et le travail fourni par le fluide W (compté négativement) (2). Le premier principe de la thermodynamique appliqué à ce cycle (3) permet d'obtenir l'équation du coefficient de performance de Carnot à partir des températures des sources chaude et froide (4).

$$\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} = 0 \quad (5.1)$$

$$\text{COP} = -\frac{Q_c}{W} \quad (5.2)$$

$$\Delta U = W + Q_f + Q_c = 0 \quad (5.3)$$

$$COP_{Carnot} = \frac{T_c}{T_c - T_f} \quad (5.4)$$

L'efficacité du cycle de Carnot permet de calculer celle des autres cycles, en la multipliant par le rendement du système étudié. Ainsi, le du COP horaire de la PAC se calcule à partir de l'efficacité de Carnot et d'un rendement thermodynamique η_{th} . Par définition, ce rendement est égal au rapport entre le COP réel et le COP de Carnot (5).

$$\eta_{th} = \frac{COP_{réel}}{COP_{Carnot}} \quad (5.5)$$

Le rendement thermodynamique supposé constant est ainsi identifié à partir du COP saisonnier fixé à 3,5 par hypothèse. La température extérieure de base utilisée pour le calcul du COP de Carnot est de 7 °C, et la température de la source chaude est estimée à 55 °C pour alimenter les émetteurs de chauffage. La pompe à chaleur utilisée est une pompe à chaleur à température moyenne. Enfin, l'efficacité de l'échangeur est liée au pincement thermique ; ce dernier correspond à l'écart minimum entre les températures du fluide frigorigène et de la source. On considère un pincement de 5 °C en surchauffe (ΔT_c) et en sous-refroidissement (ΔT_f) ; l'écart de température entre le condenseur et l'évaporateur est augmenté par ce pincement qui implique l'augmentation du travail à fournir.

Le rendement thermodynamique ainsi calculé est égal à 0,65. Les hypothèses précédentes permettent alors d'estimer le COP de la pompe à chaleur à chaque pas de temps (COP_{dyn}), à partir des températures de changement de phase (évaporation et condensation). Le calcul est présenté dans l'équation (6).

$$COP_{dyn} = \frac{T_c + \Delta T_c}{(T_c + \Delta T_c) - (T_{ext} - \Delta T_f)} \times \eta_{th} \quad (6)$$

Ainsi, les consommations énergétiques réelles sont approchées en intégrant la variation de performance due aux conditions climatiques.

5.1.1.2 Optimisation multicritère d'un bâtiment alimenté par une pompe à chaleur

Une optimisation multicritère est réalisée afin de minimiser les émissions de GES et le coût d'investissement du bâtiment de logements collectifs L1, présenté dans le deuxième chapitre de cette thèse. L'espace de recherche est décrit dans le Tableau 3-2 et le Tableau 3-3, les variables de décision concernent l'épaisseur d'isolant des différentes parois et le type ainsi que la taille des fenêtres. Cette optimisation comprend onze gènes, dont sept gènes discrets et quatre catégoriels ; ils sont décrits pour rappel dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1 : Description des gènes de l'optimisation multicritère

Gène	Unité	Allèles
Épaisseur de laine de verre –murs extérieurs	cm	1, 7, 10, 15, 20, 25 et 30
Épaisseur de polystyrène expansé - plancher bas	cm	1, 7, 10, 15, 20, 25 et 30
Épaisseur de polyuréthane - toiture	cm	1, 7, 10, 15, 20, 25 et 30
Pourcentage de surfaces vitrées – façade sud	%	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
Pourcentage de surfaces vitrées – façade est	%	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
Pourcentage de surfaces vitrées – façade nord	%	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
Pourcentage de surfaces vitrées – façade ouest	%	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
Type de fenêtres – façade sud	-	Double vitrage – triple vitrage
Type de fenêtre – façade est	-	Double vitrage – triple vitrage
Type de fenêtre – façade nord	-	Double vitrage – triple vitrage
Type de fenêtre – façade ouest	-	Double vitrage – triple vitrage

Aucune contrainte n'est imposée, cependant le taux d'inconfort est calculé pour chaque individu évalué au cours de l'optimisation, il pourra faire l'objet d'une étude en post-traitement afin de s'assurer que les solutions proposées soient réalistes. Les consommations sont calculées à partir du mix dynamique attributionnel de l'année 2016 déjà implémenté dans les travaux précédents, pour une durée de vie du bâtiment de 100 ans. Les hypothèses thermiques et environnementales sont inchangées par rapport à celles présentées dans le deuxième chapitre excepté le moyen de production de chaleur ; il s'agit désormais d'une pompe à chaleur dont les performances ont été présentées au paragraphe 5.1.1.1. Le front de Pareto final de l'optimisation multicritère est présenté à la Figure 5-1, il s'agit de l'ensemble des solutions non dominées de la vingtième génération.

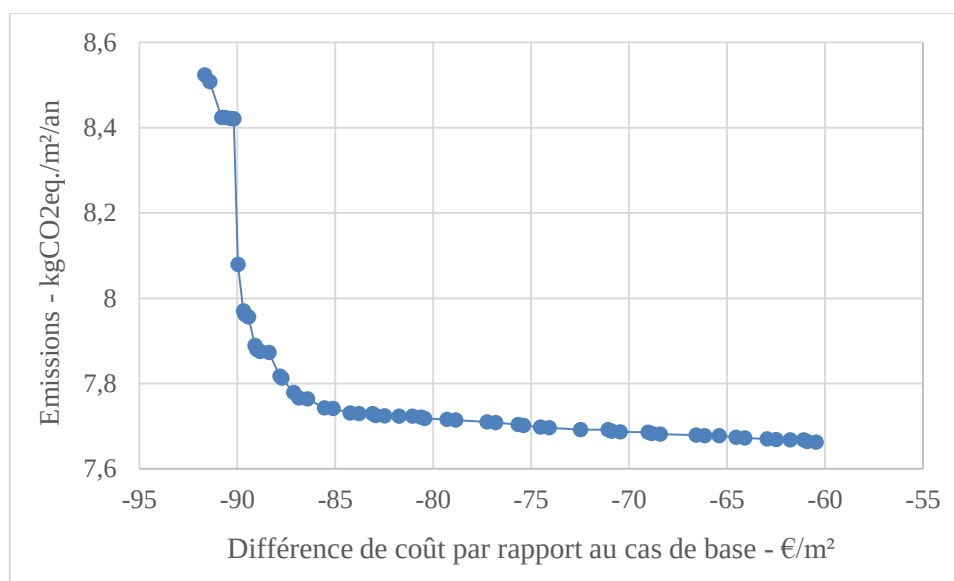


Figure 5-1 : Front de Pareto de la variante PAC du bâtiment L1

Les résultats de la Figure 5-1 montrent une faible variation des émissions de gaz à effet de serre, entre 7,6 et 8,6 kgCO₂eq./m²/an, tandis que la différence de coût d'investissement des solutions du front de Pareto optimal par rapport au cas de base varie de - 92 €/m² à - 60 €/m². Ce bâtiment est chauffé par une pompe à chaleur dont le COP est égal à 3,5 dans les conditions nominales, cela implique d'une part que les consommations sont faibles, de par l'efficacité du système de production de chaleur ; d'autre part le mix électrique attributionnel français est très peu carboné, la majorité de la production d'électricité provenant de centrales nucléaires. Les émissions de GES relatives à la production de chauffage étant très faibles, les individus appartenant au front de Pareto optimal ne correspondent pas tous aux individus présentant le minimum de besoins de chauffage ; les autres postes de consommation ne sont pas optimisés, mais l'évaluation environnementale est réalisée sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, donc les étapes de construction, de rénovation et de fin de vie influencent les résultats. Cependant, on observe à travers la Figure 5-2 que la tendance globale correspond à une amélioration de la performance énergétique pour diminuer les émissions de GES.

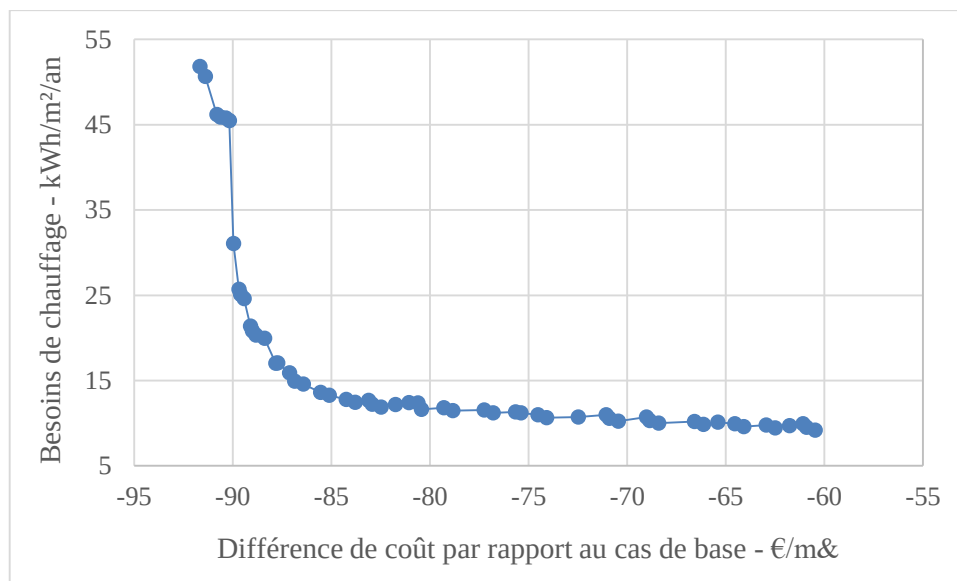


Figure 5-2 : Besoins de chauffage des individus appartenant au front de Pareto final

Afin d'affiner l'interprétation, la contribution des étapes du cycle de vie à l'indicateur de changement climatique des solutions du front de Pareto est présentée à la Figure 5-3, dans laquelle les différents postes de consommation de l'étape d'utilisation sont détaillés.

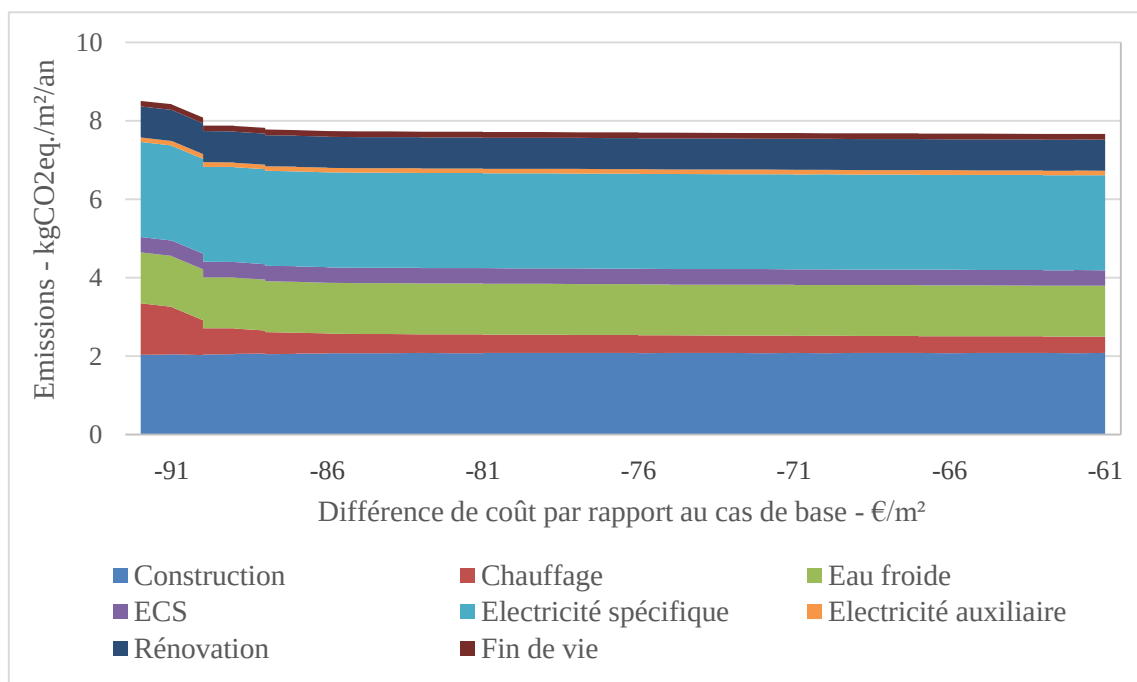


Figure 5-3 : Contribution des étapes du cycle de vie et des postes de consommation aux émissions de GES

Ces résultats montrent l'intérêt de l'analyse de cycle de vie qui permet une compréhension globale des impacts environnementaux, prenant en compte les différentes étapes du cycle de vie. La fabrication, le remplacement et le traitement en fin de vie des composants du bâtiment engendrent des impacts qu'il est nécessaire de comptabiliser, afin de ne pas biaiser l'aide à la décision. De plus, la méthode de l'ACV

est d'autant plus importante que l'évaluation précise d'un critère environnemental doit être complétée par l'analyse d'autres critères, afin de fournir une aide à la décision complète et objective.

Bien que les émissions de GES soient faibles, il est tout de même nécessaire de prendre en compte les améliorations possibles afin de ne pas négliger les solutions optimales ; toute réduction des émissions de gaz à effet de serre, même légère, est bénéfique. D'autre part, la méthode appliquée à ce cas d'étude montre que de nombreux compromis existent afin de baisser considérablement le coût d'investissement, ce qui devrait intéresser les concepteurs et les aménageurs.

5.1.1.3 Etude comparative

La réalisation de l'optimisation environnementale du bâtiment de logements L1 avec une pompe à chaleur comme système de production de chaleur permet de comparer les solutions optimales obtenues avec le réseau de chaleur urbain dans le chapitre 3, et compléter ainsi l'aide à la décision fournie aux concepteurs et aux aménageurs. Les émissions de gaz à effet de serre des individus résultant de l'optimisation du bâtiment L1 présentée au chapitre 3 sont comprises entre 10,7 et 17,3 kgCO₂eq./m²/an, tandis que les émissions de GES des individus du front de Pareto de l'optimisation implémentant la PAC sont comprises entre 7,6 et 8,6 kgCO₂eq./m²/an. Cette différence vient des points relevés précédemment, relatifs à la mise en place d'une PAC, soit la faible teneur en carbone du mix électrique et l'efficacité de la pompe à chaleur réduisant les consommations. L'investissement quant à lui n'est pas considérablement différent étant donné que le coût des systèmes n'est pas pris en compte faute de données sur les coûts liés au réseau de chaleur (extension du réseau, raccordement, sous-station). La différence par rapport au cas de base ne prend donc en compte que l'enveloppe. Les solutions non dominées des deux optimisations sont présentées conjointement à la Figure 5-4.

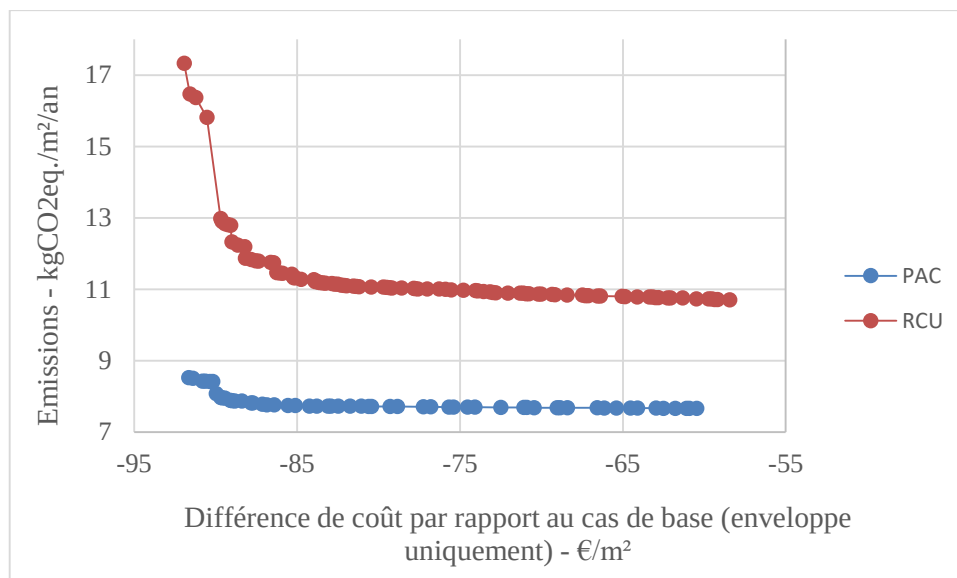


Figure 5-4 : Comparaison des fronts de Pareto des variantes PAC et RCU du bâtiment L1

L'espace de décision permet une très bonne performance du bâtiment étudié, qui a donc très peu de besoins énergétiques lorsque l'épaisseur d'isolant dans les façades est élevée, ce qui est le cas des solutions les plus chères des fronts de Pareto. De plus, la production de chauffage et d'ECS à partir d'une pompe à chaleur de coefficient de performance moyen 3,5 engendre des émissions de GES variant de 0,4 à 1,3 kg CO₂ eq./m²/an au sein des individus du front de Pareto optimal. Les solutions chères mais très peu émettrices en GES correspondent généralement à un bâtiment très isolé, une surface de fenêtres minimale et du triple vitrage dans le but de minimiser les besoins de chauffage. Mais avec de si faibles valeurs d'émissions de GES dans le cas de la PAC, il n'est pas toujours intéressant de rechercher la plus forte isolation du bâtiment, et le compromis entre les émissions de GES provenant de l'étape de construction, particulièrement de la fabrication des composants, et du chauffage du bâtiment n'est plus évident. Les GES émis lors de l'étape de construction du bâtiment des solutions du front de Pareto optimal sont représentés à la Figure 5-5 ; la variation entre les différentes solutions est très faible, mais on constate tout de même l'augmentation des émissions avec l'amélioration de la performance du bâtiment, car les solutions les plus chères correspondent aux solutions présentant de faibles besoins de chauffage. Bien que très faible, la variation d'émissions de GES au cours de l'étape de construction influence les résultats de l'optimisation, car selon l'ACV attributionnelle, le chauffage émet très peu de GES dans le cas de l'intégration de la PAC. Les besoins de chauffage ont été présentés précédemment à la Figure 5-2. Il est important de préciser que les résultats sont présentés pour une année, donc la contribution de l'étape de construction est très dépendante de la durée de vie du bâtiment ; la réglementation RE2020 impose une durée de vie de 50 ans, mais cette durée ne reflète pas la durée de vie réelle d'un bâtiment, elle correspond à une valeur par défaut tirée de l'analyse structurelle (Palacios-Munoz et al., 2019). Afin de ne pas défavoriser les bâtiments à haute performance environnementale, à longue durée de vie, lors des analyses de cycle de vie, la durée de vie choisie est de 100 ans.

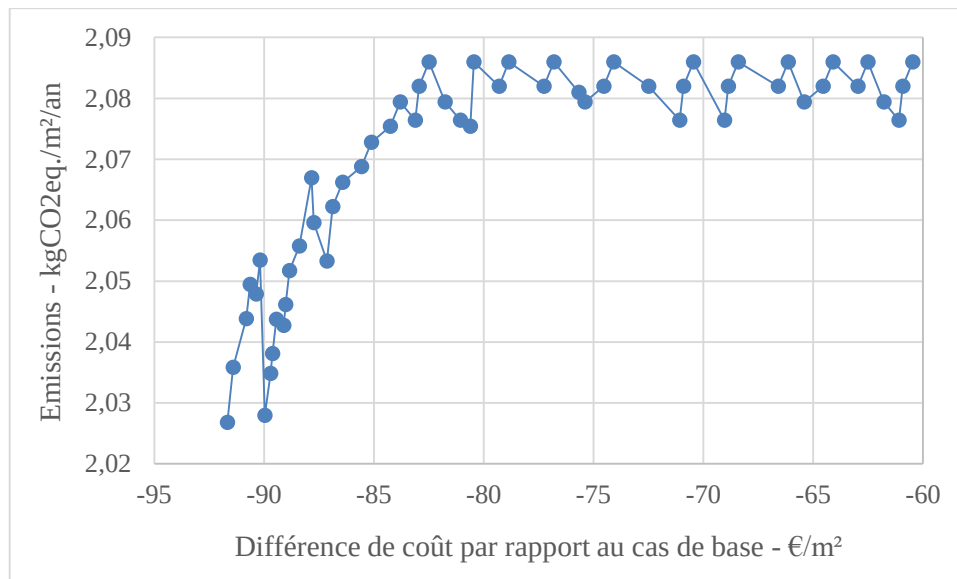


Figure 5-5 : Emissions de GES du front de Pareto, sur l'étape de construction du bâtiment (variante PAC)

5.1.1.4 Comparaison de l'évolution de l'hypervolume

Afin de comparer quantitativement les deux variantes d'optimisation, on s'intéresse à la valeur de l'hypervolume. L'hypervolume augmente au cours des générations, cela traduit une progression vers la convergence au cours des simulations. Les fronts de Pareto des deux variantes ont des valeurs différentes, l'hypervolume sera donc également différent. On choisit alors de comparer la vitesse de convergence des variantes en étudiant le pourcentage de diminution de l'hypervolume d'une génération n par rapport à la génération $n-1$. Les résultats sont présentés sur la Figure 5-6. On remarque alors que l'hypervolume ne diminue plus significativement à partir de huit générations ; cela confirme la convergence de l'algorithme, effectué sur 20 générations.

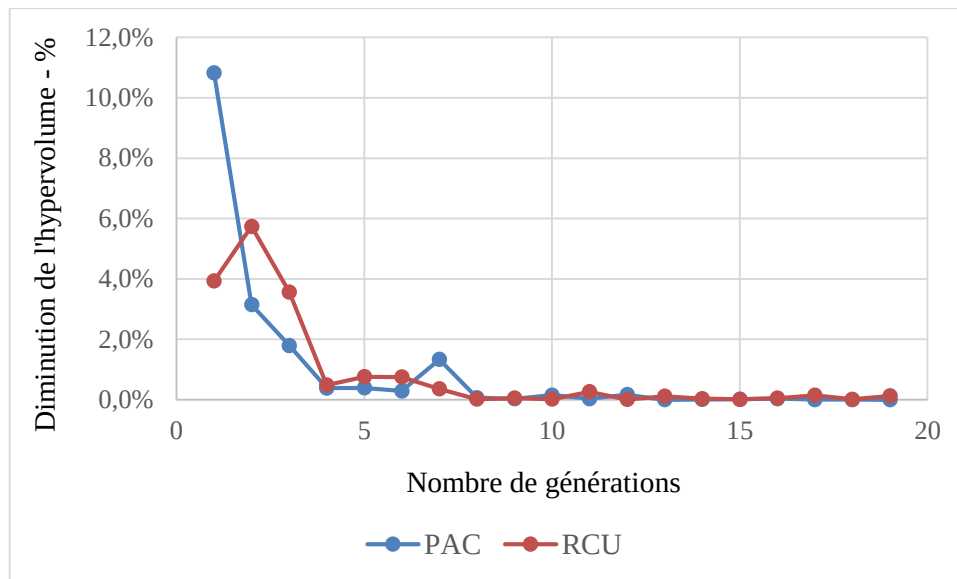


Figure 5-6 : Pourcentage de diminution de l'hypervolume entre deux générations successives

5.1.1.5 Modèle dynamique du RCU

Le réseau de chaleur considéré dans l'ensemble de cette thèse est alimenté à 54 % par l'énergie bois et à 46 % par du gaz, cette répartition a été établie dans l'ensemble des évaluations faites jusqu'à présent. Cependant, les installations ne fonctionnent pas avec ces ratios en permanence, mais en cascade. Généralement dans le cas des réseaux de chaleur alimentés en bois et en gaz, la chaudière bois est d'abord mise en marche (priorité 1) car le combustible bois est plus économe que le gaz. Une fois que cette chaudière atteint son taux de charge maximal, la chaudière gaz est mise en route afin de combler la demande restante ; on peut alors parler de chaudière gaz appoint, ou de priorité 2.

Ce raisonnement simplifié de la mise en marche en cascade des chaudières a été intégré au code d'optimisation, permettant d'évaluer les impacts du RCU de manière dynamique, en corrélant les besoins horaires avec la charge disponible et la priorité des chaudières. La puissance nominale est définie comme la puissance maximale appelée au cours de l'année. La puissance de la chaudière bois est considérée égale à 54 % de la puissance nominale. À chaque heure de l'année, si la demande est inférieure à la capacité de la chaudière bois, alors l'impact horaire correspond à l'impact d'un kWh produit à partir de l'énergie bois multiplié par la consommation et par un coefficient de 1,10 pour prendre en compte 10 % de pertes sur le réseau de chaleur. Si la demande est supérieure à la capacité de la chaudière bois, alors l'impact horaire correspond à l'impact de la production de chaleur maximale produite par la chaudière bois ajouté à l'impact du reste de la demande produite par la chaudière gaz, également multiplié par le coefficient 1,10 afin de prendre en compte les pertes. Ainsi, les impacts dus à la production de chaleur sont répertoriés heure par heure.

La chaudière bois émet très peu d'émissions de GES par rapport à la chaudière gaz, les émissions de GES des individus du front de Pareto sont donc plus faibles, on observe sur la Figure 5-7 qu'elles sont comprises entre 7,7 et 9,2 kgCO₂eq./m²/an.

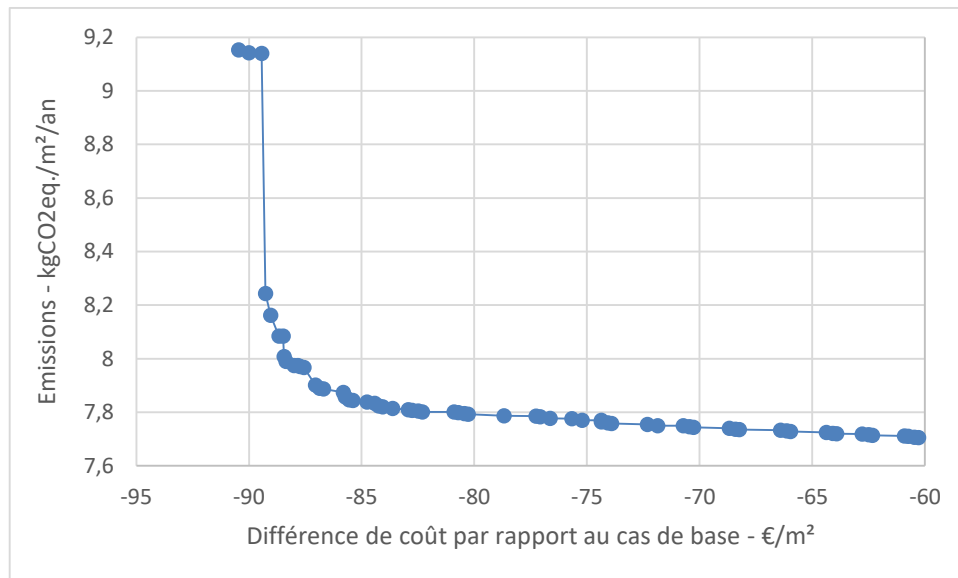


Figure 5-7 : Front de Pareto de l'optimisation intégrant un RCU dynamique

Tous les individus présents sur le front de Pareto sont composés de double vitrage et du minimum de surface vitrée, soit 20 % des parois opaques. Les solutions les moins chères comprennent 1 cm d'isolant dans les façades, cependant la solution la moins chère n'est pas atteinte à la vingtième génération ; la solution la moins chère de la Figure 5-7 comprend 25 cm de polystyrène dans le plancher bas et 7 cm de polyuréthane en toiture ; l'individu comprenant 1 cm d'isolant dans chacun des parois n'est pas présent sur le front de Pareto. Le nombre de génération a alors été augmenté afin de vérifier le bon fonctionnement de l'algorithme, les deux fronts de Pareto, de la vingtième et de la cinquantième génération sont présentés à la Figure 5-8.

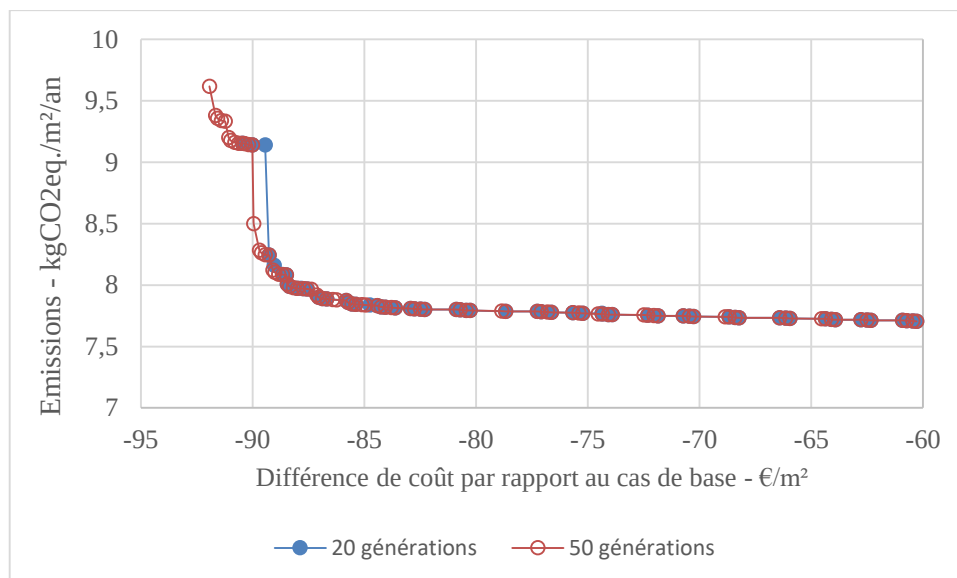


Figure 5-8 : Fronts de Pareto de la vingtième et cinquantième génération

La solution la moins chère de l'espace de recherche est atteinte à la cinquantième génération, il s'agit de la solution ayant 1 cm d'isolation dans chaque paroi (façades, plancher bas, toiture), le minimum de surface vitrée et du double vitrage. On observe que l'optimisation arrêtée à la vingtième génération atteint la majorité des solutions finale, excepté quelques solutions économes et très émissives en GES. Les émissions de GES des solutions du front de Pareto final de la cinquantième génération sont comprises entre 7,7 et 9,6 kgCO₂eq./m²/an, et le coût d'investissement par rapport au cas de base varie de - 60 à - 92 €/m².

On constate ainsi que le modèle dynamique du RCU permet d'estimer plus finement les émissions de GES, qui se rapprochent alors de celles obtenues en considérant une PAC, les fronts de Pareto correspondant à ces optimisation sont présentés Figure 5-9.

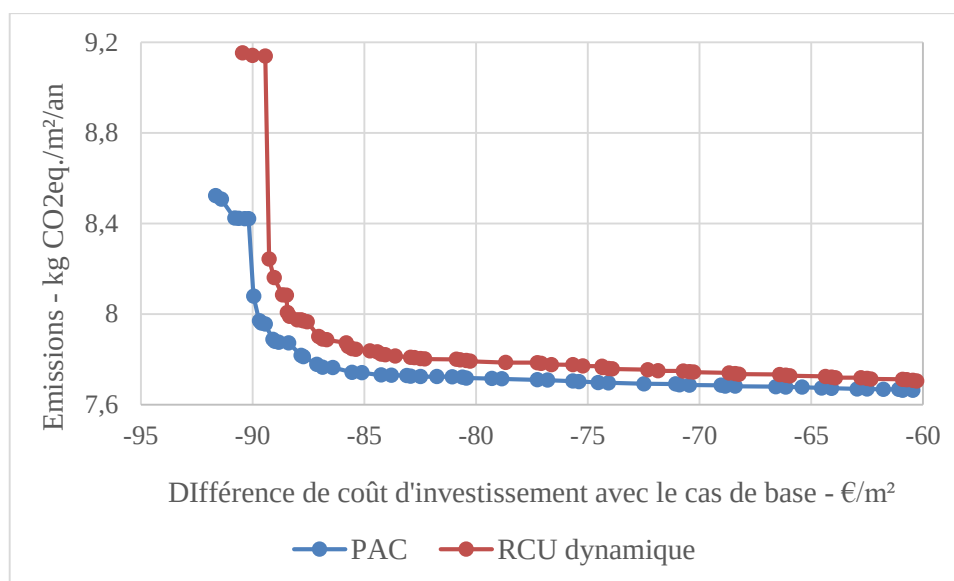


Figure 5-9 : Fronts de Pareto de l'optimisation du bâtiment de logements L1 obtenus avec différents systèmes de production de chaleur

5.1.2 Mix électrique

5.1.2.1 Étude comparative des mix récents et futurs proches

Le mix électrique utilisé ainsi que le moyen de chauffage ont une forte influence sur les consommations énergétiques et sur les impacts environnementaux associés. Un mix électrique annuel est relativement approximatif, ne tenant pas compte des variations temporelles de la demande d'énergie ni des technologies disponibles en temps réel. Un modèle de mix dynamique a donc été implémenté pour mener à bien les évaluations ACV. Ce mix a été établi sur la base du modèle développé par Roux (2016) selon une approche attributionnelle, considérant les capacités techniques de production d'électricité de l'année 2016 et les données météo RT2012. Le mix électrique déterminé peut orienter les décisions vers le choix d'un système de chauffage ou un autre, selon le choix d'une approche attributionnelle ou conséquentielle, ou selon l'année de référence.

Une étude comparative appliquée aux bâtiments du quartier des Lumières a été menée afin de comprendre l'influence du mix électrique. Les caractéristiques thermiques des bâtiments et les hypothèses relatives à la simulation environnementale sont présentées dans le chapitre 2. Deux approches différentes ont été implémentées, attributionnelle (A) et conséquentielle (C), ainsi que différentes années d'application afin de considérer un mix ancien (2016) et un mix du futur proche (2025). L'approche conséquentielle considère un mix marginal dérivé provenant du modèle établi par Roux (2016). Différents systèmes de chauffage ont également été comparés afin d'observer la conséquence du mix électrique sur le choix préconisé du système de chauffage. L'effet joule (EJ), une

pompe à chaleur de COP moyen 3,5 (PAC) et le réseau de chaleur (RCU) alimenté par un ratio constant de bois et de gaz, implémenté dans le quartier des Lumières, sont comparés.

L'étude a été appliquée à deux bâtiments d'usages différents du quartier des Lumières, il s'agit du bâtiment de logements L1 et du bâtiment de bureaux R2, dont la composition et les caractéristiques thermiques et environnementales ont été précisées au chapitre 2. La contribution des différents postes de consommation aux émissions de GES du bâtiment L1 selon le système de production de chaleur, l'approche et l'année considérée est présentée à la Figure 5-10. La comparaison appliquée au bâtiment R2 est présentée à la Figure 5-11.

On observe des résultats très variables selon le type de mix et son année de référence sur le bâtiment de logement. Les impacts du réseau de chaleur urbain ne dépendent pas du mix électrique car il est alimenté en bois et en gaz, les impacts sont donc identiques dans les approches attributionnelle et conséquentielle. Cependant, dans le cas de l'utilisation d'une pompe à chaleur, les émissions de GES varient de manière conséquente ; le mix attributionnel est très peu carboné, car il est composé à 76 % de nucléaire, et à 21 % d'énergies renouvelables telles que le solaire, l'éolien et l'hydraulique. Seule la demande de pointe nécessite des énergies fossiles très émettrices en GES. Le mix conséquentiel de l'année 2016 est quant à lui beaucoup plus carboné, car il comprend une grande partie de la demande de pointe, étant donné qu'il traduit l'ajout d'une demande au réseau électrique engendré par la construction du bâtiment. Ainsi, les émissions de GES de chaque poste de consommation sont décuplées, et l'électricité spécifique est responsable de la majorité des émissions sur l'année, car un scénario constant de 5 W/m² de puissance dissipée a été établi pour représenter la consommation d'électricité nécessaire aux occupants des logements. Concernant le poste de chauffage, nous avons montré que l'implémentation d'un tel réseau de chaleur impliquait d'importantes émissions de GES, tandis que la PAC alimentée par le modèle de l'année 2016 mix électrique attributionnel engendrait peu d'émissions. Dans le cas du mix conséquentiel, l'impact sur le changement climatique du bâtiment chauffé par la PAC est plus élevé que l'impact du bâtiment dans lequel le RCU est utilisé comme moyen de production de chaleur. Cela montre l'importance des variabilités provenant de la sélection du mix électrique, qui peuvent modifier les conclusions d'une étude destinée à l'aide à la décision. Le mix conséquentiel de l'année 2025 quant à lui est très peu carboné, car on considère dans ce modèle que les énergies fossiles sont minoritaires.

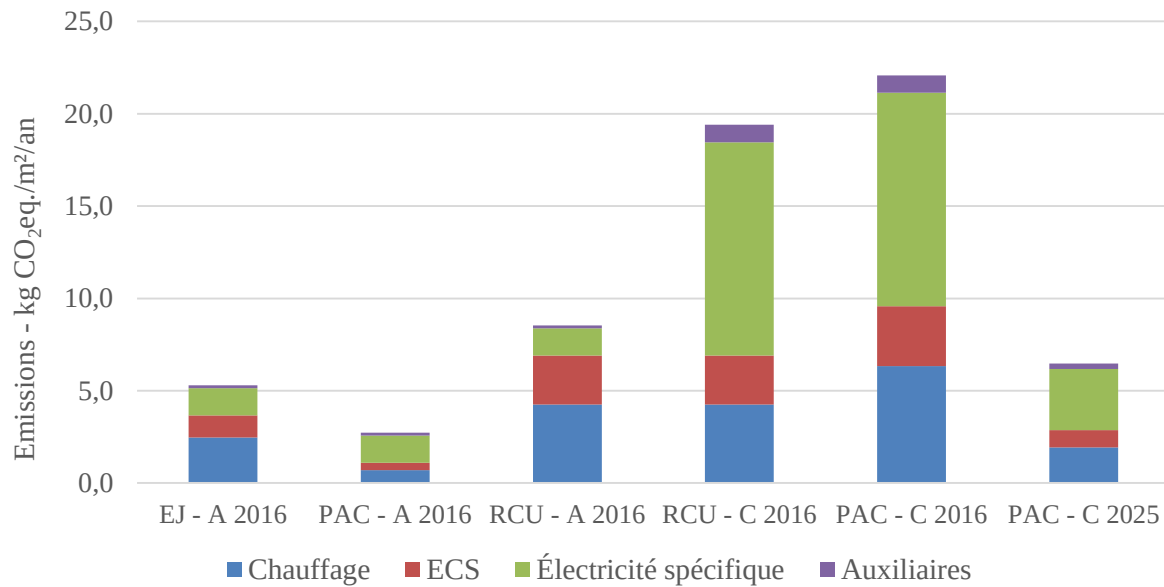


Figure 5-10 : Répartition des émissions de CO₂eq. du bâtiment de logements selon le mix électrique et le système de chauffage (PAC, RCU et EJ –effet Joule)

Le choix du type de chauffage du bâtiment de bureaux est moins sensible à la sélection du mix, car l'électricité spécifique est le poste de consommation le plus important dans ce bâtiment de par son usage qui nécessite une alimentation des ordinateurs et un éclairage intense. Ainsi, les émissions de GES varient principalement en fonction de l'approche sélectionnée, attributionnelle ou conséquentielle, d'où la nécessité d'établir les hypothèses de l'évaluation environnementale en fonction du problème à résoudre. Les postes de chauffage, d'ECS et de climatisation influencent peu les résultats, car les besoins sont faibles ; la climatisation pourrait influencer légèrement les émissions de GES, mais la performance du système de climatisation diminue d'un facteur 3 les consommations (EER = 3), ainsi dans le cas du mix conséquentiel ce poste augmente légèrement les émissions, mais pas de manière significative. De plus, la climatisation est nécessaire en période estivale, au cours de laquelle la demande énergétique est plus faible, le mix est donc moins carboné car les énergies fossiles n'interviennent que rarement ; tandis que l'électricité spécifique correspond à l'année entière, et est également consommée lors des périodes de pointe, les émissions associées sont donc plus élevées que les émissions de GES dues à la climatisation. La prise en compte d'un mix horaire permet de considérer ces variations temporelles et contextuelles pour mieux représenter les impacts environnementaux générés par l'usage du bâtiment.

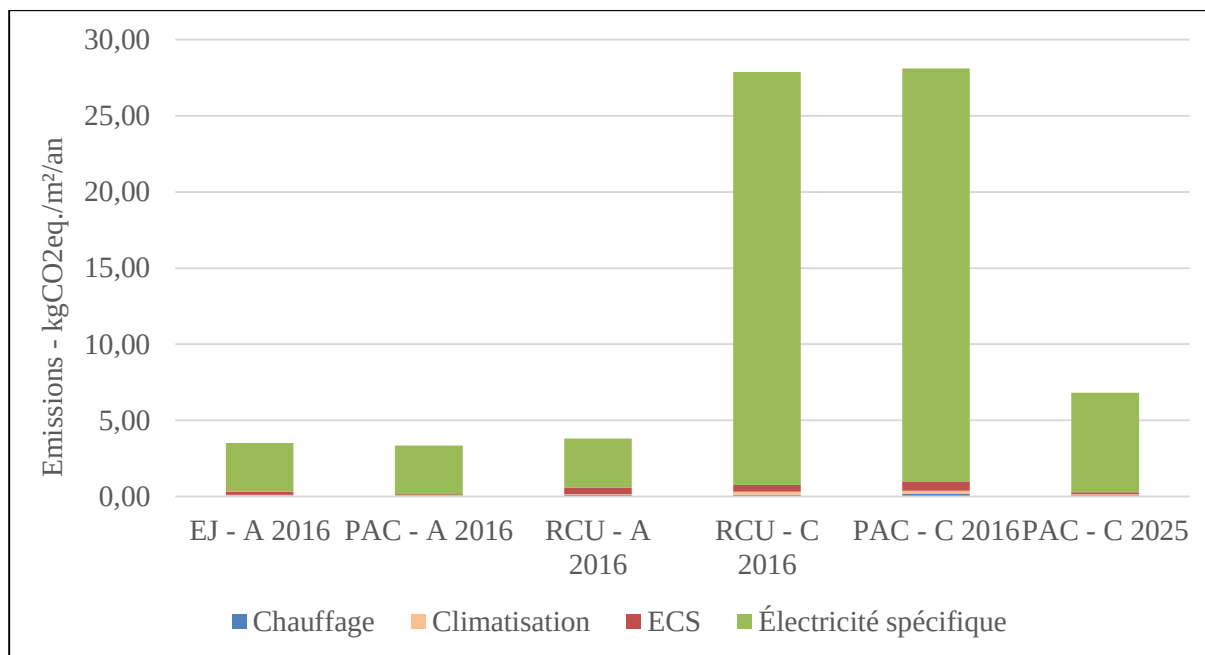


Figure 5-11 : Répartition des émissions de CO2eq. du bâtiment de bureaux suivant le mix électrique et le système de chauffage (PAC, RCU et EJ –effet Joule)

L'étude comparative des mix électriques a montré l'influence du système de production de chaleur et de l'approche sélectionnée pour l'ACV. Le mix conséquentiel est le plus approprié pour étudier la performance environnementale d'un bâtiment car l'ACV conséquentielle prend en compte l'influence de ce dernier sur le système d'arrière-plan (et donc en particulier sur le système électrique). La comparaison des systèmes énergétiques effectuée en première partie de ce chapitre pourrait laisser penser que la pompe à chaleur est le système à mettre en place en priorité du fait de son faible impact sur le changement climatique. Cependant, ces résultats ont été établis avec un mix attributionnel correspondant aux impacts moyens du réseau électrique national. En réalité, c'est la production marginale qui est induite par les nouveaux bâtiments, il s'agit donc du mix conséquentiel, qui est plus carboné car sa part en énergie fossiles est importante.

5.1.2.2 Mix prospectif

Le mix de production d'électricité évolue au cours de la longue durée de vie du bâtiment notamment à travers l'évolution des capacités de production sur le long terme. Il est utile de prendre en compte les aspects prospectifs, même si les incertitudes sont importantes. Un mix conséquentiel prospectif est constitué en interpolant des données du scénario fourni par RTE pour l'année 2025, ainsi que des scénarios élaborés par l'Ademe pour les années 2035 et 2050 (Frapin et al., 2022). Le mix de 2050, à l'issue de la transition énergétique, est prolongé ensuite. Le mix marginal est évalué à chaque heure selon la méthode GHG du Greenhouse Gas Protocol (Broekhoff, 2007). Pour définir la production marginale, les technologies de production sont classées dans l'ordre du *merit order* (technologies fatales,

production hydraulique et autres renouvelables, nucléaire, gaz, charbon, technologies de pointes). Le niveau de production à la marge est fixé à 10 % de la production totale à chaque heure.

L'optimisation environnementale du bâtiment de logements L1 a été réalisée, avec l'objectif de minimiser les émissions de GES et le coût d'investissement. Le système de production de chauffage et d'ECS est une pompe à chaleur, de COP moyen annuel 3,5 dont l'évolution en fonction des conditions météorologiques est prise en compte. Le mix électrique considéré est le mix dynamique conséquentiel prospectif décrit ci-dessus. Les émissions de GES en fonction de la différence de coût d'investissement avec le cas de base (enveloppe seule) sont présentées sur la Figure 5-12. Les émissions de GES des solutions du front sont comprises entre 13 et 16 kgCO₂eq./m²/an, contrairement à la même optimisation réalisée à partir d'une approche attributionnelle, qui considèrerait des émissions comprises entre 7,6 et 8,6 kgCO₂eq./m²/an.

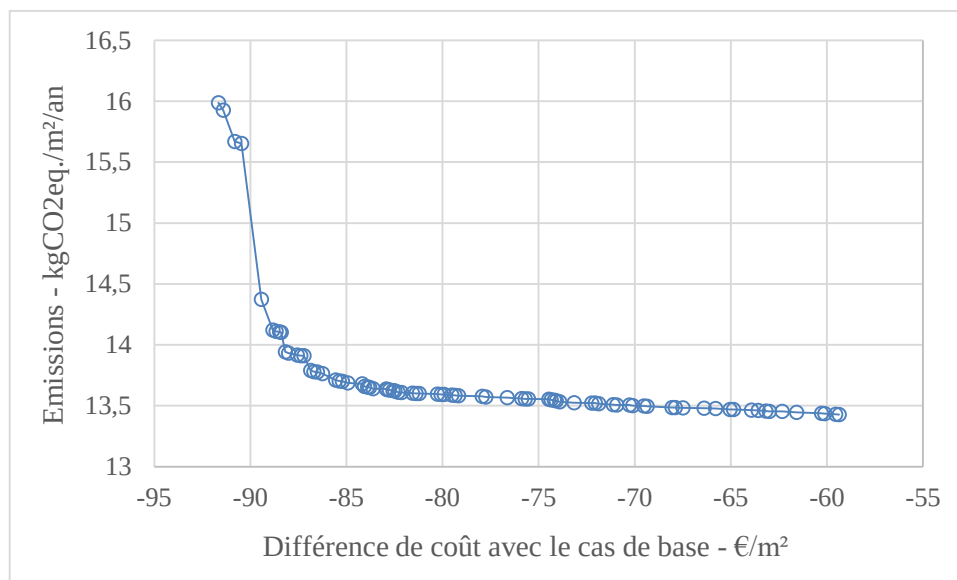


Figure 5-12 : Front de Pareto de l'optimisation du bâtiment L1, comprenant une pompe à chaleur et un mix dynamique conséquentiel prospectif

Le choix de l'approche ACV, de la prise en compte ou non des aspects prospectifs, et entre un modèle statique ou dynamique du RCU, peut ainsi conduire à des résultats très différents, illustrés Figure 5-13. La comparaison entre RCU et PAC dépend ainsi de ces choix méthodologiques, et des incertitudes liées aux scénarios prospectifs.

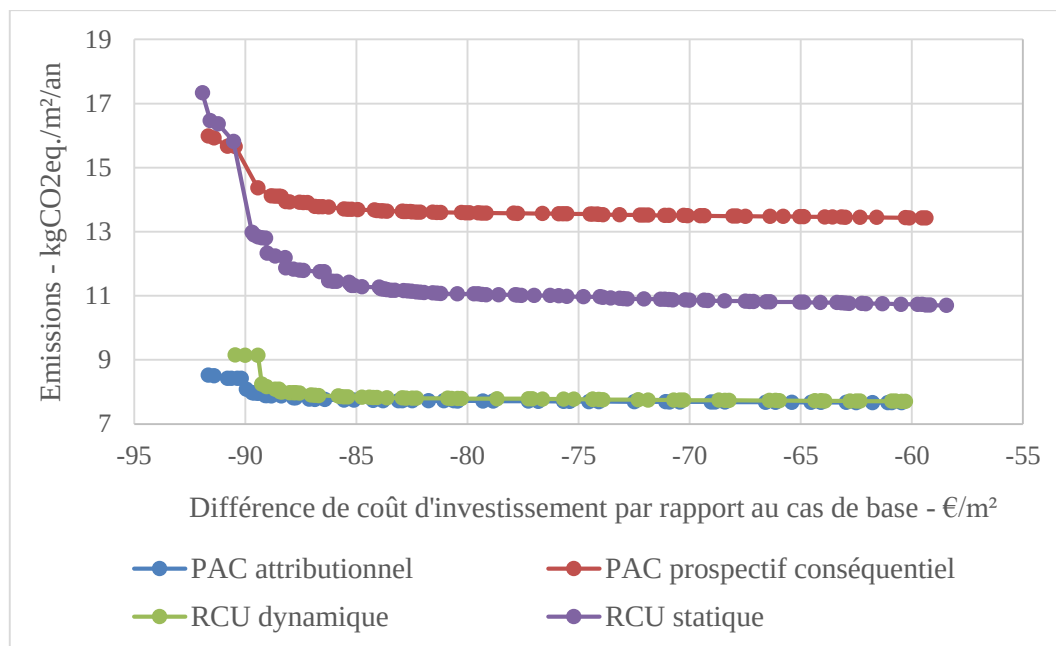


Figure 5-13 : Fronts de Pareto finaux des optimisations du bâtiment de logements L1 selon l'approche d'ACV et le modèle du RCU sélectionnés.

5.2 L'ACV appliquée au quartier du cas d'étude

L'optimisation environnementale d'un bâtiment permet de fournir une aide à la décision utile au projet de conception ou de rénovation d'un bâtiment ; afin d'augmenter les leviers d'action il est possible d'élargir l'échelle de l'étude, en réalisant une optimisation multibâtiment. Cette procédure a été présentée au chapitre 3, il s'agit d'optimiser les bâtiments séparément puis d'obtenir les meilleures solutions de l'ensemble des bâtiments en réalisant un post-traitement. La méthode a été appliquée à l'échelle monobâtiment sur le bâtiment de logements collectifs L1 ; l'application à l'échelle multibâtiment sur trois autres bâtiments du quartier fait l'objet de cette partie.

Dans un premier temps, une optimisation environnementale est réalisée sur les trois bâtiments de logements sélectionnés, nommé L2, L3 et L5, puis les solutions non dominées de la vingtième génération de chaque optimisation sont agrégées pour proposer une aide à la décision commune aux trois bâtiments. Pour cela, le post traitement est réalisé sur les résultats d'optimisation des bâtiments deux à deux ; la combinaison des solutions non dominées des bâtiments L2 et L3 sera étudiée et produira un front de Pareto, puis les solutions non dominées résultant de la combinaison des deux fronts précédents seront combinées avec les résultats du front de Pareto de l'optimisation du bâtiment L5. Enfin, l'optimisation sera appliquée à deux bâtiments d'usages différents, pour lesquels les principaux contributeurs sont distincts (importance de l'ECS dans les logements, et de l'électricité spécifique dans les bureaux).

5.2.1 Optimisation de trois bâtiments de logements

En vue de présenter une application de l'optimisation à l'échelle multibâtiment, trois optimisations environnementales sont réalisées sur les bâtiments de logements collectifs L2, L3 et L5. L'objectif est de minimiser les émissions de GES et le coût d'investissement d'un bâtiment en faisant intervenir 100 individus au cours de 20 générations. Les hypothèses thermiques et les choix effectués pour réaliser les évaluations environnementales ont été présentés au chapitre 2 de cette thèse. Le système considéré pour la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire est le réseau de chaleur urbain implémenté dans le quartier des Lumières. L'espace de recherche comprend 7 gènes qui sont détaillés dans le Tableau 5-2.

Tableau 5-2 : Description de l'espace de recherche

Gène	Unité	Allèles
Épaisseur de laine de verre –murs extérieurs	cm	1, 7, 10, 15, 20, 25 et 30
Épaisseur de polystyrène expansé - plancher bas	cm	1, 7, 10, 15, 20, 25 et 30
Épaisseur de polyuréthane - toiture	cm	1, 7, 10, 15, 20, 25 et 30
Pourcentage de surfaces vitrées – façade sud	%	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
Pourcentage de surfaces vitrées – façade est, nord, ouest	%	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
Type de fenêtres – façade sud	-	Double vitrage – triple vitrage
Type de fenêtre – façade est, nord, ouest	-	Double vitrage – triple vitrage

Les besoins de chauffage des bâtiments dépendent de différentes caractéristiques dont leur emplacement, qui détermine les masques solaires. La surface, les besoins de chauffage et le coût d'investissement du cas de base (isolation thermique et fenêtres) des trois bâtiments étudiés sont précisés dans le Tableau 5-3.

Tableau 5-3 : Caractéristiques des bâtiments L2 et L3

	Surface (m ²)	Besoins de chauffage (kWh/m ²)	Coût de base (€)
L2	4725	18	979 339
L3	5622	21	1 086 282
L5	3804	28	932889

Les solutions non dominées de l'optimisation du bâtiment L2 sont présentées sur la Figure 5-14. Les individus du front engendrent une émission entre 10,5 et 17 kgCO₂eq. par surface habitable et par année, pour une différence de coût avec le cas de base comprise entre -85 et -5 €/m².

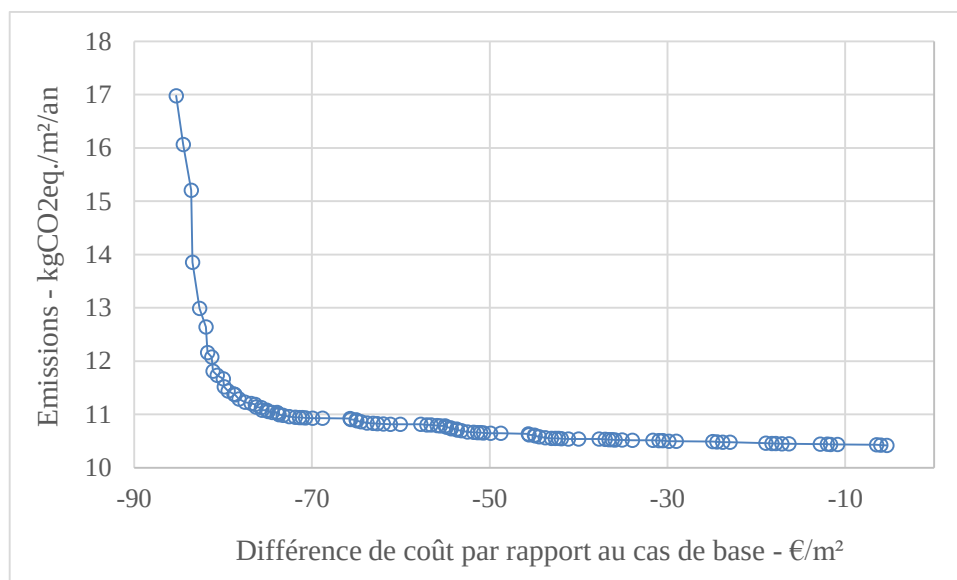


Figure 5-14 : Front de Pareto de l'optimisation du bâtiment de logements L2

Les solutions du front suivent une tendance similaire à celle obtenue suite à l'optimisation du bâtiment L1 et présentée dans le chapitre 3, avec tout de même quelques différences. En effet, certaines solutions peu émettrices en GES (et donc les solutions les plus chères) comprennent une surface de vitrage de la façade sud plus élevée que le minimum de l'espace de recherche. La taille des fenêtres des autres façades correspond cependant au minimum de surfaces vitrées. Cette différence concernant la surface de vitrage de la façade sud s'explique par la performance énergétique d'une grande partie des individus du front. Les besoins de chauffage des solutions les moins chères s'élèvent à 55 kWh/m²/an mais diminuent rapidement avec l'amélioration de la performance énergétique des variantes de bâtiment, notamment par l'ajout d'isolant dans les murs extérieurs. La Figure 5-15 présente les besoins de chauffage des différentes solutions du front de Pareto optimal, on constate cette chute dès les premiers centimètres d'isolant, seulement 6 solutions sur les 107 individus du front présentent des besoins de chauffage supérieurs à 20 kWh/m²/an.

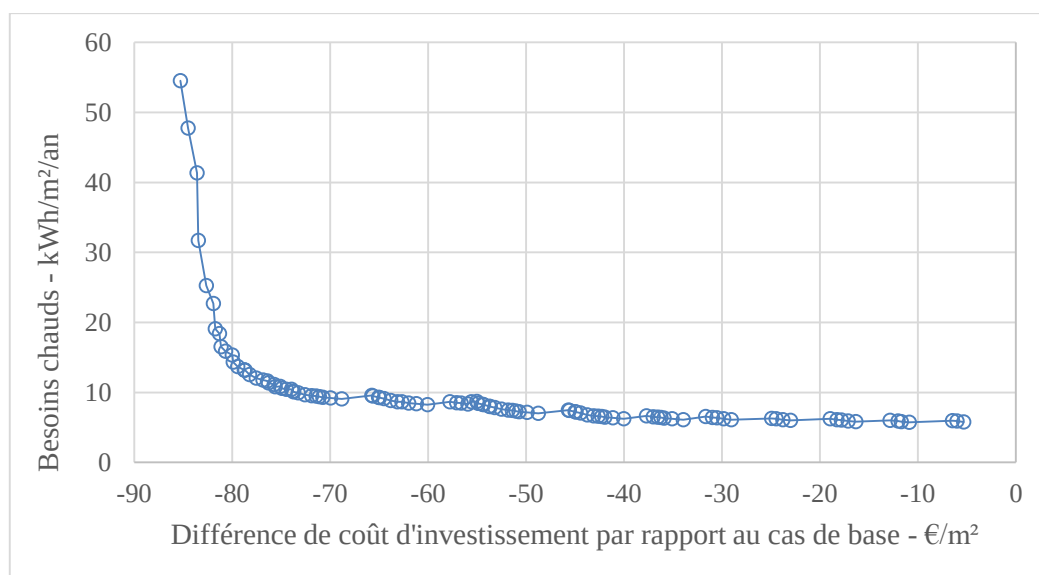


Figure 5-15 : Besoins de chauffage en fonction de la différence du coût d'investissement par rapport au cas de base

L'épaisseur d'isolant dans les murs extérieurs, le type des fenêtres et la taille des fenêtres de la façade sud des solutions non dominées de l'optimisation sont illustrées sur la Figure 5-16. La majorité des variantes ont des parois extérieures isolées au maximum, ce qui permet de réduire drastiquement les besoins de chauffage.

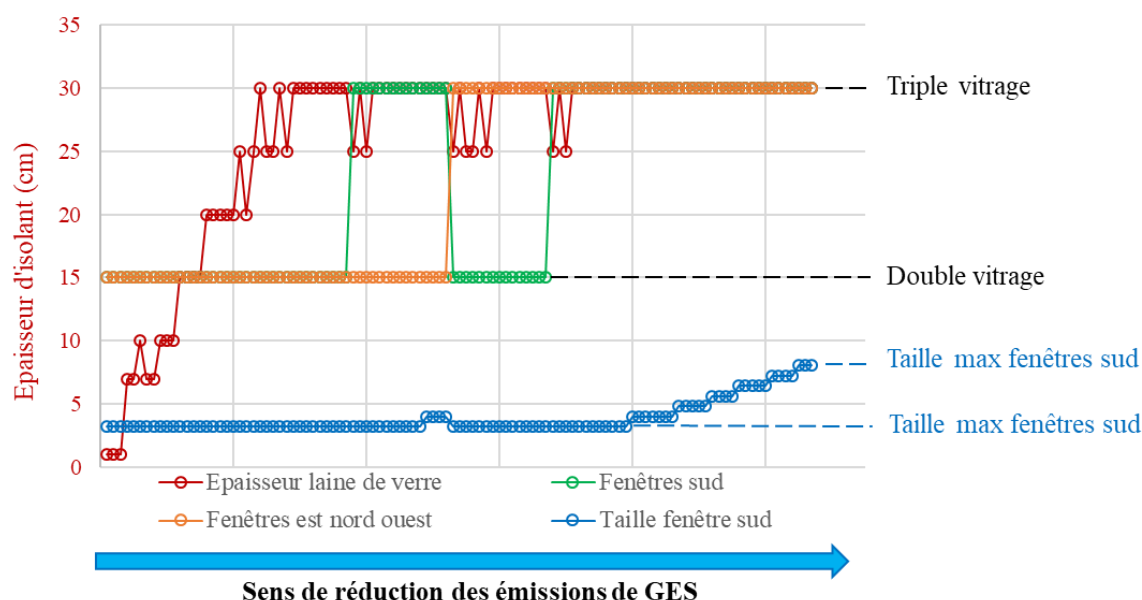


Figure 5-16 : Ordre des choix les plus efficaces à mettre en œuvre pour réduire les émissions de GES

Suite à ces premiers résultats, deux autres optimisations ont été réalisées, pour trouver les meilleurs compromis entre les émissions de GES et le coût d'investissement des bâtiments de logements collectifs L3 et L5. Les différents besoins de chauffage des bâtiments régissent les solutions obtenues, étant donné

que les autres postes de consommation ne sont pas optimisés. Les fronts de Pareto des trois optimisations réalisées sont présentées sur la Figure 5-17, et les besoins de chauffage en fonction de la différence de coût d'investissement avec le cas de base sont illustrés à la Figure 5-18 afin de montrer la corrélation entre les émissions de GES et la performance énergétique des bâtiments. Le coût d'investissement des individus du front est exprimé à travers la différence du coût d'une solution et de la variante de base, divisée par la surface habitable du bâtiment.

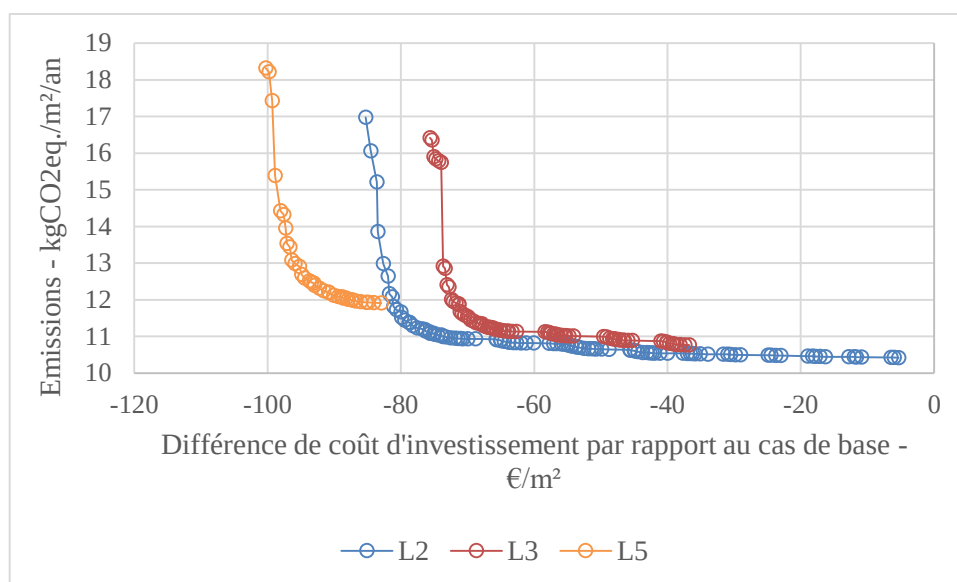


Figure 5-17 : Émissions de GES des solutions des fronts de Pareto en fonction du coût d'investissement pour les 3 bâtiments

On constate que chaque optimisation de bâtiment permet de réduire les émissions de GES jusqu'à 7 kg de CO₂eq./m²/an entre les solutions extrêmes des fronts. La différence de coût d'investissement avec la variante de base varie entre -75 et -36 €/m² pour le bâtiment L3, et de -100 à -83 €/m² concernant le bâtiment L5. Ce dernier ne comprend pas de solutions ayant des coûts proches de la variante de base, les solutions chères ne sont pas présentes sur ce front de Pareto. Il pourrait s'agir d'une limite de l'algorithme, mais il est probable que cela vienne du fait que le bâtiment L5, dont les besoins de chauffage sont légèrement plus élevés que les autres bâtiments étudiés de par son emplacement très ombragé au sein du quartier, n'aboutisse à aucun compromis intégrant une plus grande surface de vitrage qui corresponde à une solution non dominée.

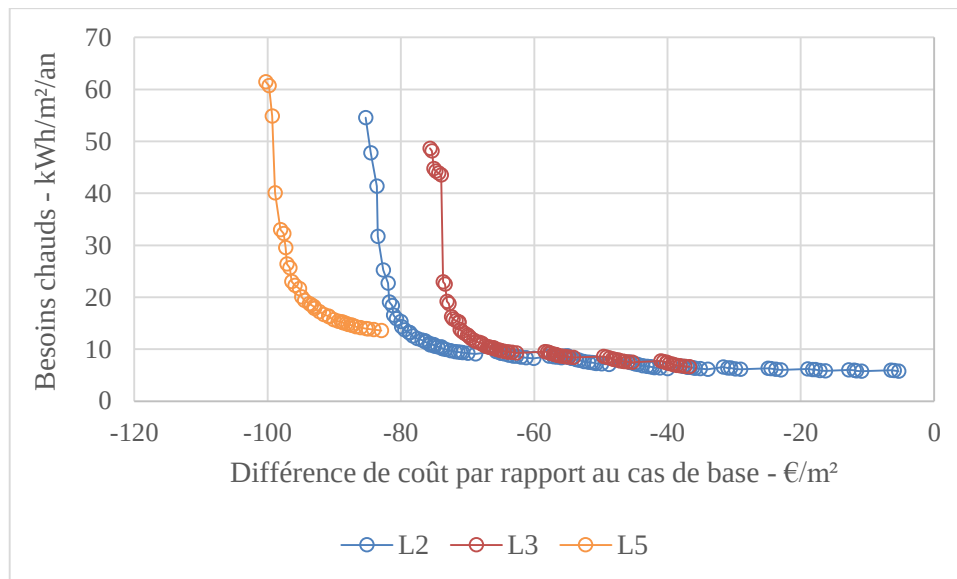


Figure 5-18 : Besoins de chauffage des solutions des fronts de Pareto en fonction du coût d'investissement

Ces trois optimisations contiennent de nombreuses solutions non dominées pour un bâtiment, il s'agit désormais d'obtenir les solutions non dominées à l'échelle multibâtiment. Pour cela, nous appliquons la procédure de post-traitement expliquée dans le chapitre 3 : toutes les solutions résultant des optimisations des bâtiments L2 et L3 sont combinées, les solutions non dominées sont donc additionnées deux à deux formant un nouveau couple comprenant les émissions de GES et le coût d'investissement. Ainsi, la solution la moins chère du bâtiment L2 combinée à la solution la moins chère de L3 apparaîtra comme la solution la moins chère du front de Pareto résultant de ce post-traitement, et il en est de même pour la solution la moins émettrice en GES ; d'autre part, de nombreuses solutions intermédiaires seront prises en considération, correspondant à l'addition de deux solutions non dominées.

L'ensemble des solutions issues de la combinaison des deux fronts monobâtiments est ensuite trié afin d'obtenir uniquement les solutions non dominées au sens de Pareto. Ce nouveau jeu d'individus est représenté sur la Figure 5-19. Le tri a été effectué à partir d'un code python, qui a pour fonction d'additionner toutes les solutions des deux fronts de Pareto deux à deux puis de les trier au sens de Pareto. La différence, par rapport au cas de base, de coût d'investissement est exprimée en €/m², la surface correspondant à la somme des deux bâtiments évalués.

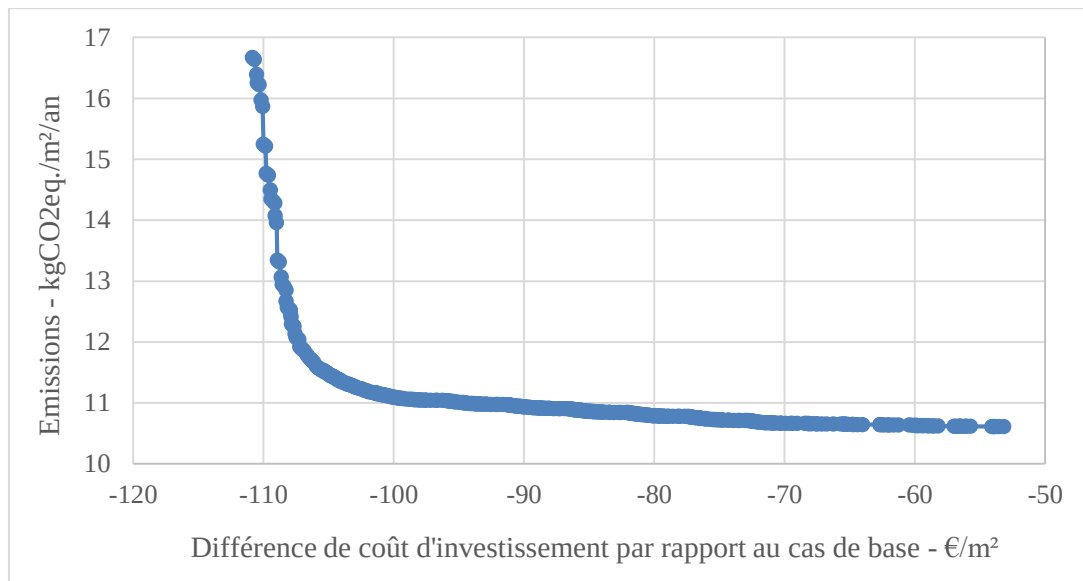


Figure 5-19 : Front de Pareto résultant de la combinaison des solutions non dominées des bâtiments L2 et L3

Une fois le front de Pareto combiné obtenu, les solutions du troisième bâtiment étudié, L5, sont additionnées aux solutions combinées, à travers les mêmes opérations que la procédure précédente. Lorsque toutes les solutions des trois optimisations sont combinées, on obtient de très nombreuses solutions. Il est nécessaire de prendre en compte toutes les possibilités de combinaison, pour ensuite pouvoir trouver les solutions non dominées de l'ensemble. Il a été choisi de procéder de façon incrémentale pour limiter la complexité des opérations ; la combinaison des fronts de Pareto des bâtiments L2 et L3 implique la création de 8239 solutions, dont 400 s'avèrent non dominées au sens de Pareto. La combinaison de ce nouveau jeu de solutions avec le front de Pareto du bâtiment L5 engendre la création de 14800 solutions qui sont à leur tour triées pour obtenir le front de Pareto issu de la combinaison des trois bâtiments, présenté Figure 5-20. L'agrégation des résultats à partir des trois fronts de Pareto des optimisations des bâtiments L2, L3 et L5 aurait impliqué 304 843 solutions qui auraient alors dû être générées puis triées au sens de Pareto.

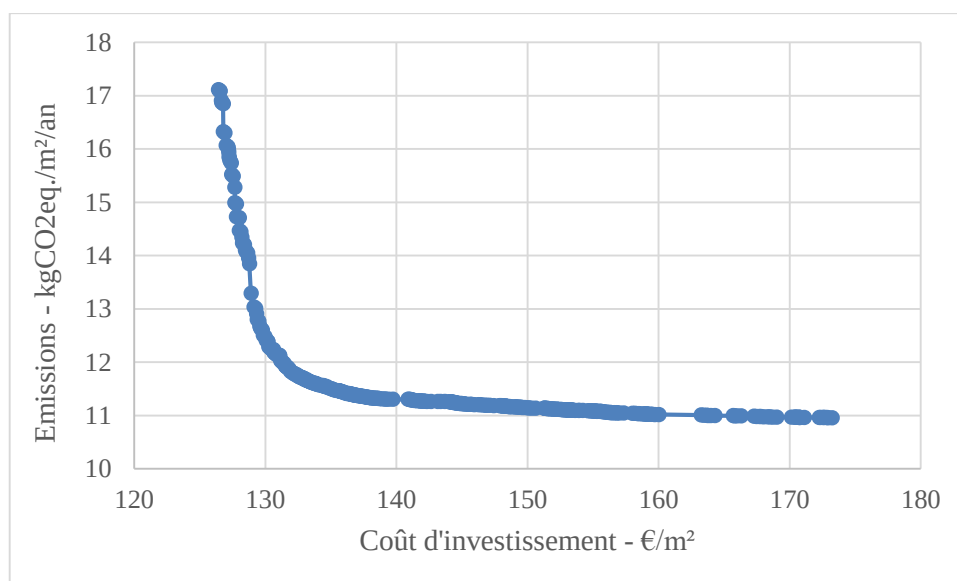


Figure 5-20 : Front de Pareto résultant de l'optimisation des trois bâtiments L2, L3 et L5

Enfin, les trois fronts obtenus par les optimisations de bâtiments, ainsi que le front de Pareto multibâtiment sont tracés sur un même graphique. On constate alors que le front résultant de la combinaison des solutions non dominées correspond à un intermédiaire entre les différents fronts ; les émissions de GES et le coût d'investissement sont exprimés par m² de surface habitable totale des différents bâtiments étudiés, ce qui permet de fournir une aide à la décision à l'échelle multibâtiment.

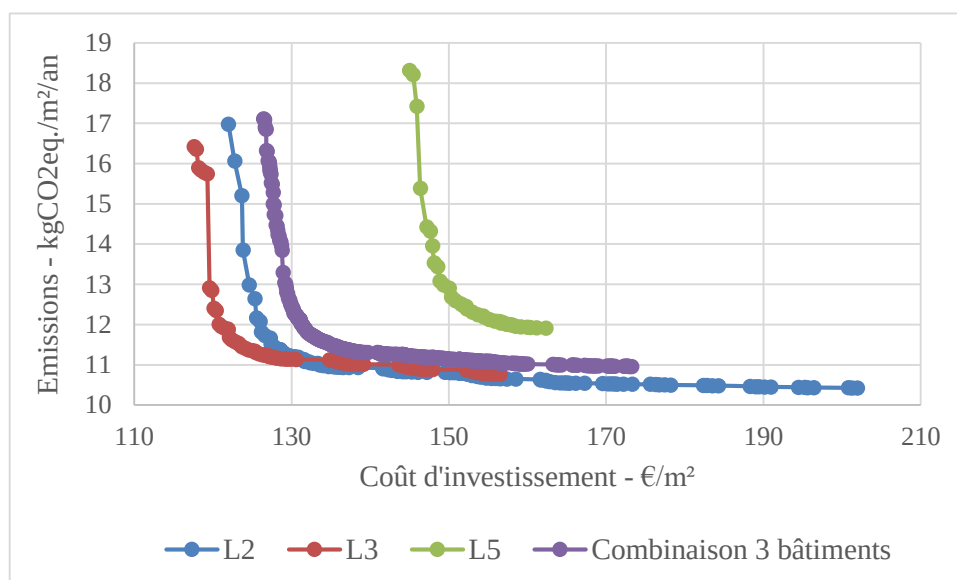


Figure 5-21 : Fronts de Pareto des bâtiments L2, L3 et L5 et de la combinaison des trois optimisations

Cette superposition des fronts montre l'intérêt d'effectuer les optimisations à l'échelle multibâtiment ; pour un coût d'investissement total fixé, il sera plus judicieux de choisir différentes solutions en fonction des bâtiments, plutôt que de proposer des caractéristiques d'enveloppe identiques pour chaque bâtiment du quartier.

5.2.2 Variabilité des résultats entre logements et bureaux

La dernière partie de cette étude consiste à comparer les résultats d'optimisation de deux bâtiments d'usage différent ; il s'agit du bâtiment de logements L1 analysé précédemment, et du bâtiment de bureaux nommé R2 appartenant au cas d'étude initial, le quartier des Lumières. La surface utile de ce dernier est d'environ 33000 m², et l'espace de décision est identique à celui détaillé dans le Tableau 5-2. On précise que les résultats des deux optimisations sont présentés ici de manière indépendante, les deux fronts n'ont pas été combinés. On constate des résultats différents ; les isolants du bâtiment de bureaux sont présents en faible épaisseur : aucune solution ne présente 30 cm d'isolant, et très peu de solutions comprennent 25 cm. La répartition de l'épaisseur d'isolant au sein des murs extérieurs entre les deux bâtiments L1 et R2 est illustrée respectivement à la Figure 5-22 et à la Figure 5-23.

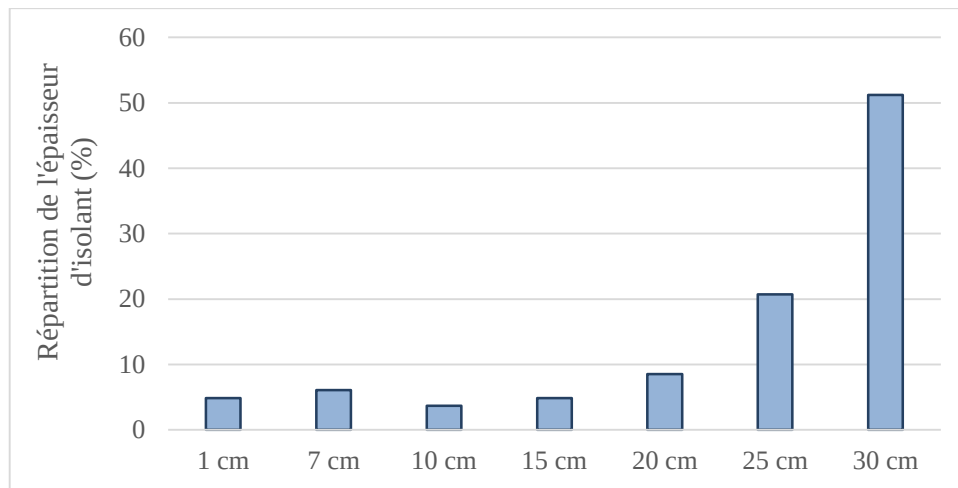


Figure 5-22 : Répartition de l'épaisseur de l'isolant au sein des murs extérieurs des solutions du front de Pareto du bâtiment L1

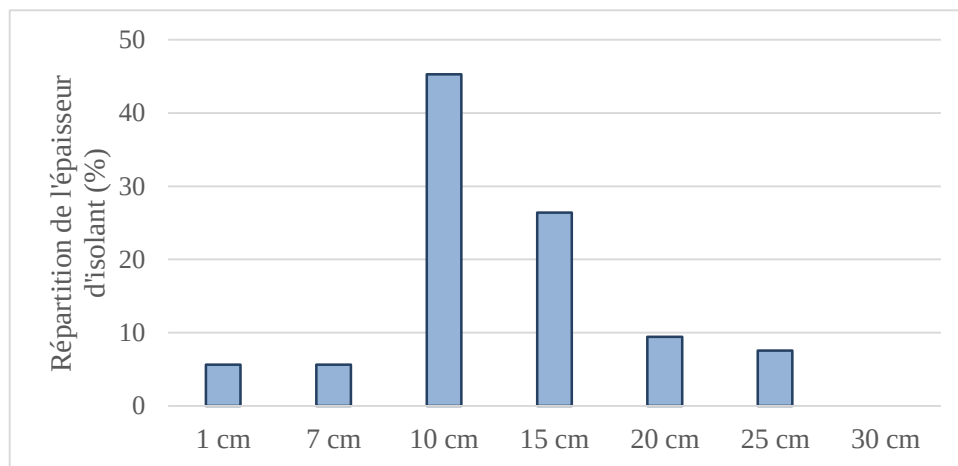


Figure 5-23 : Répartition de l'épaisseur d'isolant au sein des murs extérieurs du jeu de solutions non dominées de l'optimisation du bâtiment R2

Concernant le choix du type et de la taille de vitrage préconisés par l'optimisation, les solutions présentées Figure 5-24 sont également disparates. Les deux bâtiments ont une répartition similaire concernant le double et le triple vitrage des façades nord, est et ouest. Cependant, tandis que les solutions du bâtiment L1 se divisent entre le double et le triple vitrage sur la façade sud, le bâtiment R2 comprend en grande majorité des fenêtres double vitrage. De même, tandis que toutes les façades du bâtiment de logements comprennent une taille minimale de vitrages, les solutions du front de Pareto du bâtiment de bureaux se répartissent entre les différentes tailles de vitrage.

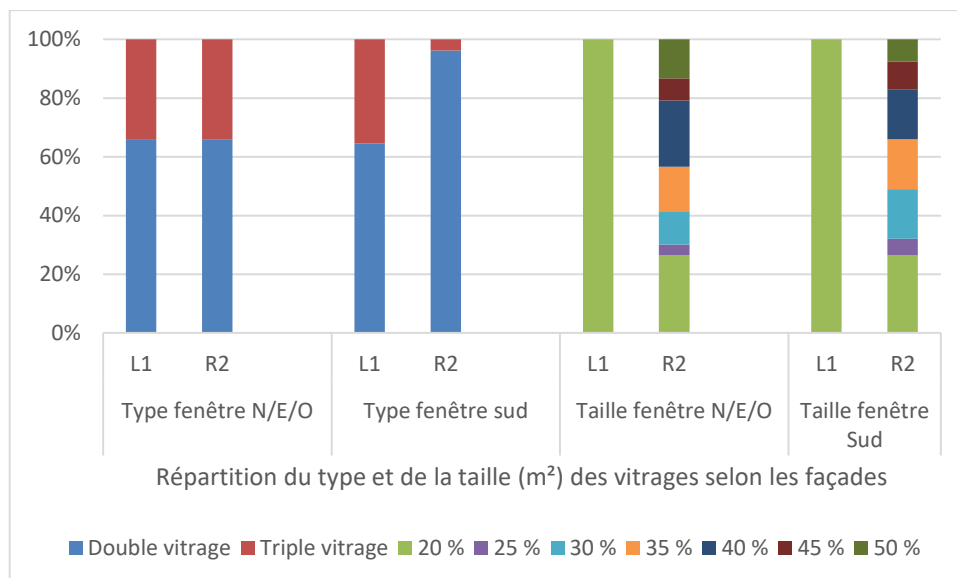


Figure 5-24 : Répartition des paramètres des fenêtres au sein des solutions des fronts de Pareto

Les fronts de Pareto des deux optimisations sont illustrés sur la Figure 5-25, on constate une faible variation des émissions de GES entre les différentes solutions du front de Pareto du bâtiment de bureaux ; seuls trois individus se différencient de par leurs besoins de chauffage plus élevés engendrant l'émission de 7 kgCO₂eq./m²/an, il s'agit des individus comprenant un centimètre de laine de verre dans les murs extérieurs. Les autres solutions comprennent 7 cm et plus d'isolant dans les façades ; cela rappelle l'efficacité des premiers centimètres d'isolant pour réduire les besoins de chauffage. Le bâtiment R2, présenté au chapitre 2, nécessite de très faibles besoins de chauffage, qui est le principal poste optimisé. Ainsi, la variation des émissions de GES est très faible, les émissions proviennent notamment de la consommation importante d'électricité spécifique dans les bâtiments de bureaux.

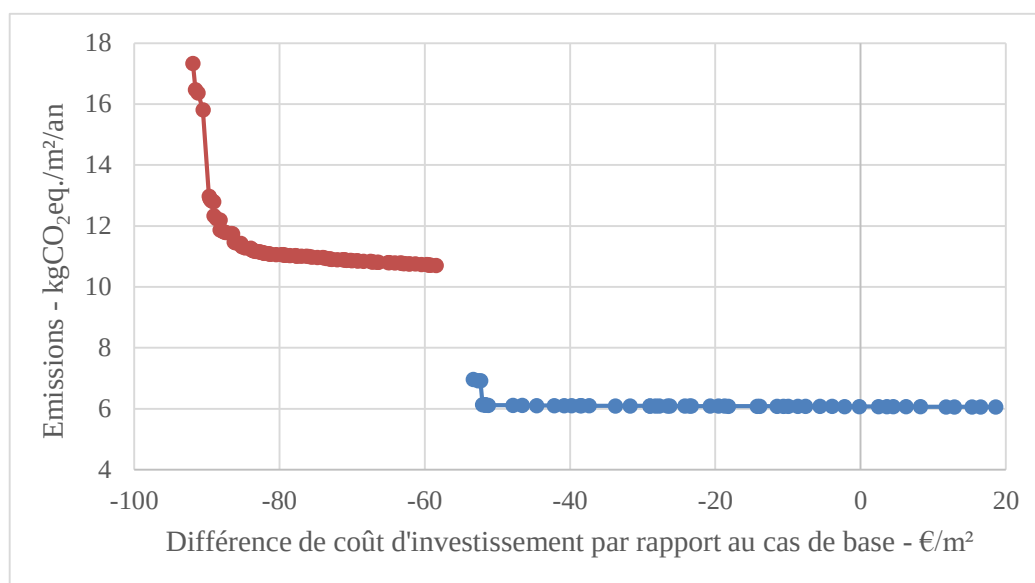


Figure 5-25 : Fronts de Pareto des optimisations des bâtiments L1 et R2

5.3 Eléments complémentaires et prise en compte des comportements

L'optimisation environnementale des bâtiments à l'échelle du quartier fait émerger une réflexion autour des frontières du système. Si le bâti fait l'objet de la procédure d'évaluation environnementale présentée dans cette thèse, les autres sources d'impacts du quartier, comme les déchets ménagers ou les transports, peuvent être évalués au moins à titre de comparaison, afin de connaître la contribution des différents éléments du quartier. Dans cette partie, nous proposons d'étendre le système à d'autres éléments du quartier afin de compléter l'aide à la décision fournie par l'optimisation multicritère des bâtiment en présentant leur contribution au sein d'un ensemble plus global. Premièrement, la gestion des déchets et la gestion de l'eau seront étudiées afin de comprendre l'influence du comportement des occupants sur ces aspects, puis une étude présentera les impacts estimés provenant du transport des habitants du quartier des Lumières. Ensuite, les enjeux de l'alimentation, notamment de l'intégration de l'agriculture urbaine en toiture seront présentés à partir d'un cas d'étude, auquel seront également ajoutés les impacts des ascenseurs et une discussion autour de l'implémentation de panneaux photovoltaïques en toiture.

5.3.1 Gestion des déchets et de l'eau

Les déchets ménagers n'ont pas été considérés jusqu'à présent, car l'optimisation environnementale portait sur le bâti, en particulier sur l'enveloppe des bâtiments ; les déchets ménagers n'auraient donc pas influencé la prise de décision. Nous cherchons désormais à connaître les impacts environnementaux associés à ce poste d'émission, afin d'estimer sa contribution au sein du quartier. Pour cela, il est considéré qu'une personne produit 1 kg de déchets ménagers en moyenne par jour, qui sont ensuite incinérés avec une valorisation énergétique. Le taux d'incinération des déchets, le rendement de la valorisation et l'énergie substituée sont gérés par les communes et les centres d'incinération des déchets d'une part, et d'autre part de nombreux acteurs peuvent réduire les impacts des déchets ménagers par le tri. La mobilisation des communes, des bailleurs et des occupants est nécessaire pour mettre en place le recyclage, d'une part, pour que la collecte soit effectuée de manière efficace, d'autre part pour que les habitants disposent des conteneurs adéquats dans ou à proximité de leur immeuble, et enfin pour que les occupants pratiquent le tri. Ce dispositif permet de réduire les impacts environnementaux, la Figure 5-26 montre l'influence du taux de recyclage du verre et du papier sur l'indicateur de changement climatique, en considérant que les déchets ménagers non recyclés sont incinérés, avec un rendement de valorisation énergétique égal à 0,90. La mise en place du tri à 70 % de ces matériaux permettrait une réduction de près de 20 % des émissions de GES provenant du traitement des déchets ménagers. D'autre part, la diminution du rendement de la valorisation augmente les émissions de GES relatives au traitement des déchets, qui s'élèvent à 16,6 kgCO₂eq./m²/an sans valorisation.

Les valeurs d'émissions de GES sont exprimées par surface habitable et par année, elles peuvent donc être considérées comme référence pour les bâtiments de logement ayant un nombre d'occupant proportionnel à la surface habitable. Dans le cas du quartier des Lumières, on compte 1 habitant pour une surface habitable de 25 m².

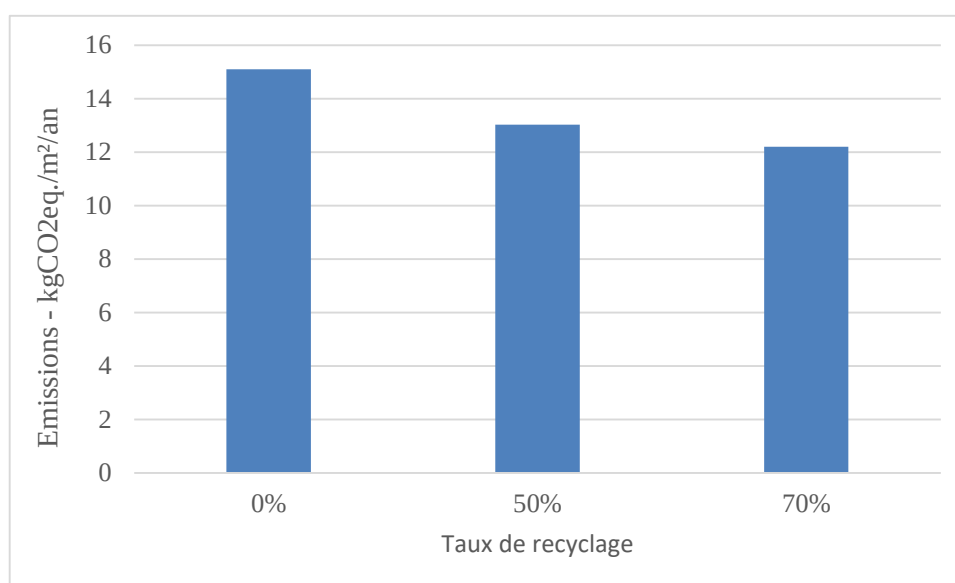


Figure 5-26 : Emissions de GES provenant du traitement des déchets ménagers en fonction du taux de recyclage du papier et du verre

L'eau est une ressource essentielle à l'activité humaine, pour la santé et le bien-être, l'agriculture, etc. Sa gestion est un processus continu et à long terme, afin de faire face à la pénurie qui devient de plus en plus courante, et à l'augmentation de la pollution. De nombreux acteurs prennent part à ce processus qui exige l'interaction des gouvernements, des agences et une organisation au niveau local, régional, national voire international mais aussi du secteur privé et des organismes caritatifs dans certains pays. La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) fournit un cadre essentiel pour atteindre les objectifs de développement durable, notamment de garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable.

Une partie de l'eau utilisé au cours du cycle de vie d'un bâtiment de logements provient de la consommation propre des occupants ; ainsi ces derniers ont la possibilité d'agir à leur échelle pour limiter l'utilisation de cette ressource précieuse en réduisant les consommations non essentielles, par exemple en limitant le temps des douches. La sensibilisation est indispensable pour rendre les comportements des occupants plus responsables, mais des moyens techniques se développent également, comme des pommeaux de douche économes en eau.. La consommation d'eau froide par personne est estimée à 100 litres par jour et par personne, elle engendre alors 1,3 kgCO₂eq./m²/an dans les bâtiments de logements dans lesquels sont considérés 25 m² par personne. La production de 40 litres d'eau chaude sanitaire par personne et par jour à 55 °C à partir du réseau de chaleur du quartier des Lumières implique l'émission de 4,41 kgCO₂eq./m²/an, une valeur élevée qui sera réduite de moitié si les occupants ne consomment que 20 litres par jour d'eau chaude à 55 °C.

L'autre poste majeur d'utilisation d'eau est la consommation d'électricité. Les habitants peuvent également réduire ces consommations ; à l'échelle d'un particulier il s'agit d'éteindre les appareils lorsqu'ils ne sont plus utilisés, d'utiliser des systèmes efficaces, ou encore d'installer un moyen de production d'électricité, tel que le solaire thermique ou le photovoltaïque.

5.3.2 Transports

L'intégration de la mobilité des occupants à l'écoconception d'un quartier nécessite la prise en compte de l'ensemble des transports urbains, dont les transports en commun (bus, train, métro et tram) et les véhicules personnels sur l'ensemble de leur cycle de vie. Les données présentées dans cette partie sont tirées d'une étude qui a été menée par un laboratoire de l'école des Ponts Paristech afin d'estimer les impacts de la mobilité sur l'environnement à partir du traitement statistique de l'Enquête Globale Transport de la région Île-de-France (François et Coulombel, 2021). Ainsi les distances parcourues quotidiennement, le type de voitures personnelles et les taux de remplissage ont été obtenus, et ont permis d'étudier la production et la fin de vie des véhicules, les émissions lors de l'usage des véhicules, la consommation de carburants et d'électricité ainsi que les impacts associés aux infrastructures.

Un habitant vivant dans un immeuble de logements collectifs du quartier des Lumières, dans le cas d'un accès important aux transports en commun (ce quartier est à proximité de la plus grande gare du Grand Paris Express), parcourt 10,3 km par jour ouvré, dont 48 % en transports en commun, 9,3 % en mode doux et 42,7 % en voiture. La distance quotidienne d'un employé de bureau de ce quartier est estimée à 18,2 km par jour ouvré, dont 81,7 % en transports en commun, 2,5 % en modes doux et 15,8 % en voiture individuelle. La répartition de l'usage des transports en commun (TC) de l'Île-de-France est considérée, soit 15 % en bus, 58 % en train, 3 % en tram et 24 % en métro. La répartition des différents transports utilisés par les habitants et les employés est illustrée Figure 5-27. Le taux de remplissage d'un véhicule individuel pour un habitant du quartier est de 1,22 par voiture, tandis que 1,28 travailleurs sont considérés par voiture.

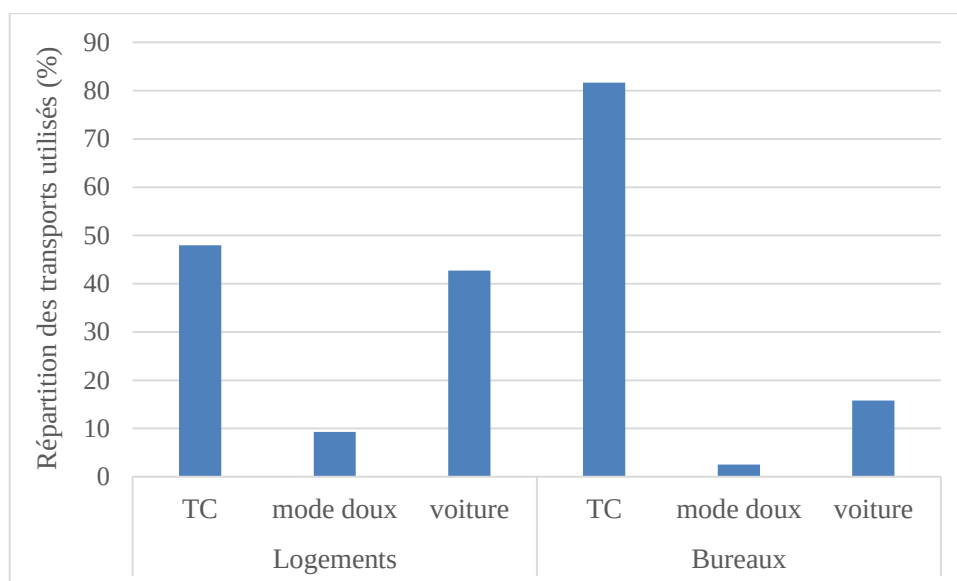


Figure 5-27 : Répartition de l'usage des transports par les habitants et les employés

Les impacts sur le réchauffement climatique générés par la mobilité quotidienne sont calculés et exprimés par m^2 et par an afin de permettre une comparaison avec le secteur des bâtiments. Dans ce projet, l'usage des transports en commun est élevé, ce qui permet de diminuer les émissions de GES, le carburant nécessaire à l'usage de la voiture étant principalement d'origine fossile et donc à l'origine d'importantes émissions de GES. La part de l'usage d'un véhicule personnel reste tout de même significative, l'impact carbone associé à ce mode est élevé, ce qui implique une forte contribution des transports au bilan carbone du quartier. On considère que la mobilité quotidienne d'un habitant émet $1,235 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$ par jour ouvré, dont $1,11 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$ liés à la voiture, et que celle d'un employé émet $1,07 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$ par jour ouvré, dont $0,686 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$ liés à la voiture.

La mobilité quotidienne des bâtiments de logements, hébergeant une personne dans 25 m^2 , implique l'émission de $12,5 \text{ kgCO}_2\text{eq./m}^2\text{/an}$ dont $11,2 \text{ kgCO}_2\text{eq./m}^2\text{/an}$ sont émis par l'usage des voitures, et concernant les bâtiments de bureaux, il s'agit de $22,3 \text{ kgCO}_2\text{eq.}$ émis par surface utile et par an, soit $14,3 \text{ kgCO}_2\text{eq./m}^2\text{/an}$ sont émis par l'usage des véhicules personnels. Ces données sont résumées sur la Figure 5-28.

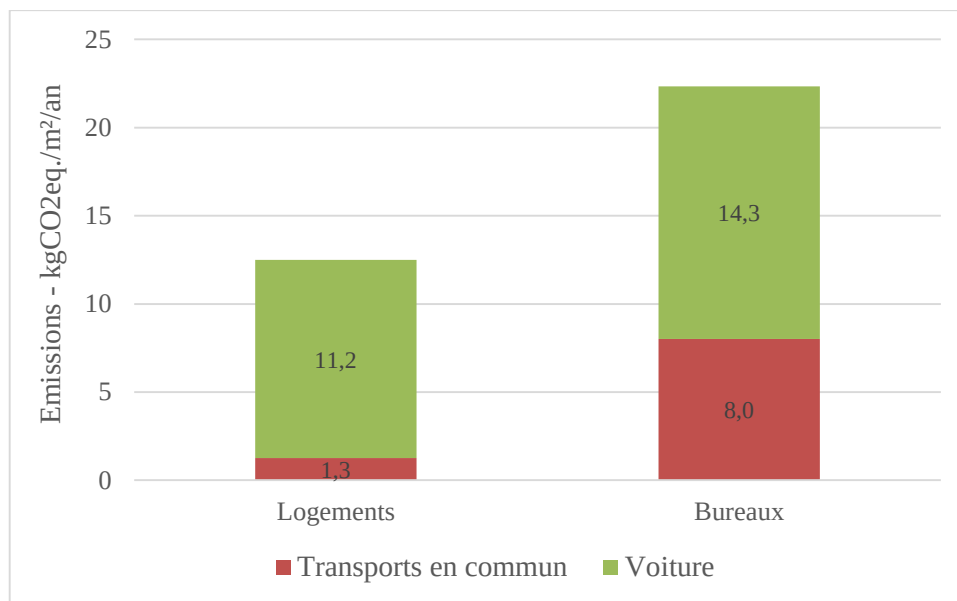


Figure 5-28 : Émissions de GES engendrées par la mobilité quotidienne

5.3.3 Alimentation

Les habitudes alimentaires des occupants du quartier ont également une influence sur l'impact environnemental global du territoire. Le secteur de l'alimentation étant en France le troisième poste émetteur en GES pour un logement (ADEME, 2018) nous souhaitons déterminer sa contribution aux émissions globales d'un habitant du quartier considéré ici. Un panier moyen français est déterminé dans un premier temps puis son évaluation environnementale est réalisée afin de connaître son impact environnemental et notamment sa contribution aux émissions de GES. Puis un levier d'action est étudié afin de réduire les émissions de GES en zone urbaine, il s'agit de mettre en place l'agriculture en toiture.

Un panier moyen par français a été estimé par l'agence nationale de sécurité sanitaire à travers l'étude INCA 3, qui permet de décrire les habitudes alimentaires des français par catégories d'aliments (ANSES, 2017). La commission européenne a également établi le panier alimentaire d'un européen moyen, composé d'une vingtaine d'aliments représentant chacun une catégorie d'aliments (European Commission et al., 2018). Cette répartition a été sélectionnée dans ce travail afin de représenter les habitudes alimentaires de façon simplifiée ; les catégories d'aliments et les quantités correspondantes du panier moyen considéré sont présentées en Annexe D. Cette démarche permet d'estimer les impacts environnementaux de ce secteur de consommation. Les fiches environnementales correspondant aux produits du panier moyen proviennent de la base de données ecoinvent (version 3.4), elles permettent la prise en compte de la production agricole, du transport au lieu de traitement, du procédé de transformation industrielle et du transport au lieu de distribution. Les impacts dus aux déchets générés sur l'ensemble du procédé sont également comptabilisés. Les données concernant le transport ont été modifiées afin d'adapter les fiches environnementales au contexte français ; les impacts du transport ont

été remplacés par les impacts du transport d'aliments en France, effectué par camion, train ou bateau. Le mix énergétique français a également été pris en compte à la place du mix européen.

Un levier d'action a alors été étudié dans l'objectif de proposer des solutions de réduction des impacts, il s'agit d'élaborer une alternative à la consommation d'aliments achetés dans le commerce. Dans le cadre de l'application de la variation paramétrique à deux typologies de bâtiments, une tour de 30 étages et trois bâtiments de 10 étages, présentées au chapitre 4, s'est posé la question de l'intégration de l'agriculture en toiture à un tel projet. Un partenariat a alors été réalisé avec un laboratoire de recherche de l'école AgroParisTech, à partir duquel nous avons pu estimer les émissions de GES. La toiture d'un bâtiment de 30 étages est exposé à des contraintes météorologiques trop importantes pour cultiver des fruits et des légumes, cependant il est possible de faire de l'agriculture urbaine en toiture d'un bâtiment de 10 étages (Dorr et al., 2021). L'étude s'est concentrée sur l'impact de la culture de fraises et de tomates en toiture, pour représenter les catégories des fruits et légumes. Pour une surface de 500 m², la possibilité de produire 2 tonnes de tomates et 2 tonnes de fraise chaque année a été déduite. Cela correspond à une production totale de 6 tonnes par an et par produit, sur les trois bâtiments de 10 étages. L'impact de la production en toiture de fraises et de tomates a été comparé avec l'impact de la même quantité de nourriture achetée dans le commerce, comprenant la production, le transport, le stockage et la distribution des aliments ; on estime alors un gain d'environ 4 tCO₂eq./an dans le cas d'une production agricole en toiture. Cette différence d'émissions de GES provient du transport et du stockage qui ne sont pas pris en compte dans le cas de l'agriculture en toiture.

Tableau 5-4 : Émissions de GES relatives à la culture des fraises et des tomates

	3 bâtiments de 10 étages	Tour de 30 étages
Provenance des aliments	Culture sur les toits	Achat dans le commerce
Émissions de GES de la culture de 6 t de fraises et de 6 t de tomates (t CO ₂ eq./an)	3,1	7,1

5.3.4 Installation photovoltaïque

La valorisation des toitures à travers l'agriculture urbaine amène un nouveau sujet de discussion, porté sur la production photovoltaïque (PV) et la réduction d'impacts environnementaux que cela pourrait engendrer. La surface disponible en toiture dépend de la forme des bâtiments et de la densité du quartier, il semble alors intéressant d'estimer les gains potentiels de la production d'électricité photovoltaïque en toiture à partir d'une étude de cas comprend différentes formes de bâtiments. Ainsi, le cas d'étude comprenant une tour de 30 étages et trois bâtiments de 10 étages est mis à contribution, en considérant l'installation de panneaux photovoltaïques en toiture en vue de produire une partie de la

consommation électrique. La production renouvelable locale permet de diminuer la demande énergétique du réseau, et donc de réduire la production de certaines sources d'énergie. Les premières sources concernées sont les plus chères ; la production d'électricité photovoltaïque permet donc d'éviter une production marginale d'électricité. Le mix conséquentiel prospectif introduit au paragraphe 5.1.2.2 est considéré afin de prendre en compte l'évolution du mix au cours des années futures. Ce mix est composé en moyenne annuelle sur les 100 prochaines années de 43 % d'électricité nucléaire, à 32 % de gaz, à 19 % de charbon et à 6 % d'énergies renouvelables.

Une inclinaison optimale de 30° a été considérée pour l'installation des panneaux photovoltaïques, orientés au sud. La surface du toit est de 750 m². Pour éviter les effets d'ombrage entre les rangées de panneaux, il est alors possible d'installer 320 m² de panneaux photovoltaïques produisant 41 000 kWh par an, soit 123 000 kWh/an pour les trois bâtiments. L'évaluation environnementale par la méthode de l'analyse de cycle de vie permet d'estimer une économie de 4,5 tonnes de CO₂eq. par toiture sur 30 ans, la fabrication des modules étant responsable de l'émission de 2,5 t CO₂eq. La comparaison environnementale de l'ensemble du cycle de vie des deux variantes de bâtiments, dont les hypothèses thermiques et environnementales ont été présentées au chapitre 4, est illustrée à travers un graphique radar à la Figure 5-29.

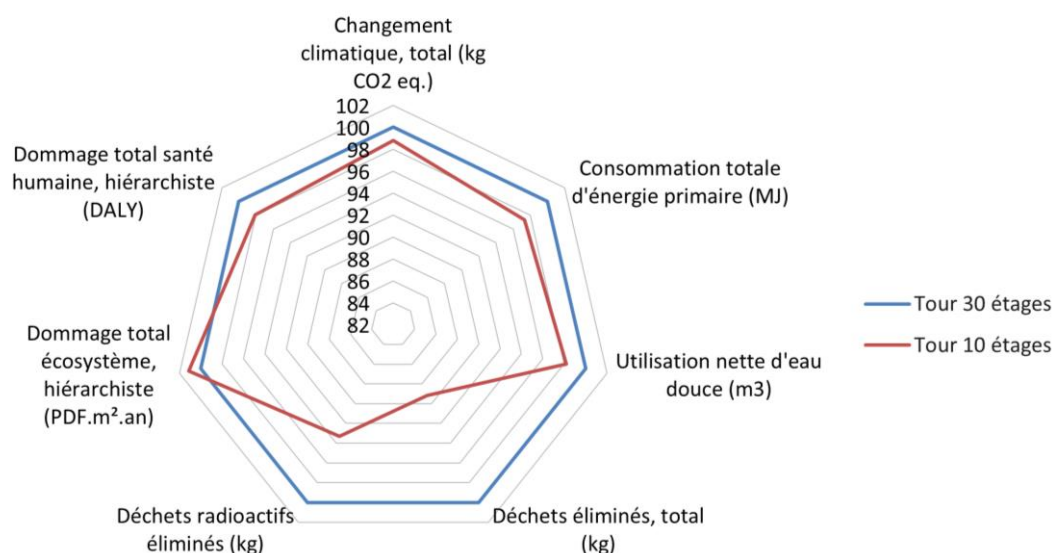


Figure 5-29 : Comparaison environnementale des deux variantes de bâtiments avec une installation PV en toiture

5.3.5 Ascenseurs

La conception des bâtiments de grande hauteur nécessite le dimensionnement d'un système de transport vertical des usagers impliquant une consommation électrique non négligeable. Cette consommation dépend de nombreux facteurs tels que le nombre d'utilisations, lié au nombre d'occupants et au type d'usage du bâtiment, le nombre d'étages ou encore le taux de charge à chaque utilisation. Le dimensionnement des ascenseurs nécessite la prise en compte de différents paramètres du bâtiment. En cohérence avec les paragraphes précédents, nous proposons d'estimer les impacts liés à la fabrication, à l'utilisation et à la fin de vie des ascenseurs d'un immeuble, en comparant les deux variantes de bâtiments, de 10 et de 30 étages.

Le code de pratique pour l'efficacité énergétique des installations d'ascenseurs et d'escaliers mécaniques (*Lift & Escalator Code*) (EMSD, 2007) propose une méthode de dimensionnement des ascenseurs prenant en compte une heure de pointe, et permettant de s'affranchir de scénarios précis d'utilisation. Le dimensionnement dépend alors de la taille de la population et de la qualité de service choisie. Le taux de charge et la vitesse nominale obtenus permettent ensuite d'estimer la consommation électrique annuelle, à partir de la méthode Th-BCE 2020. Il existe deux grandes catégories d'ascenseurs, à fonctionnement hydraulique et à traction de câbles. Les ascenseurs hydrauliques sont limités en hauteur, ils ne conviennent pas aux bâtiments de plus de 18 m de hauteur, or les bâtiments du cas d'étude, de 10 et de 30 étages font respectivement 27 et 87 m de hauteur. Un ascenseur à traction est donc considéré, avec un scénario de veille inconnu.

La quantité de matériaux nécessaires à la fabrication d'un ascenseur s'avère complexe de par le manque de données dans la littérature. Pour une évaluation en phase amont de conception, la quantité est alors supposée proportionnelle à la consommation électrique. Cette hypothèse a été confortée par l'étude de déclarations environnementales d'un fabricant d'ascenseurs, qui a montré que les émissions de GES de la production, de la maintenance de et la fin de vie des ascenseurs sont environ proportionnelles à la consommation électrique annuelle. Enfin, la durée de vie considérée pour les matériaux des ascenseurs est de 30 ans. Les quantités de matériaux sont répertoriées en Annexe E.

La vitesse nominale recommandée des ascenseurs de 10 et de 30 étages est respectivement de 1,5 m/s et de 4,5 m/s (Kiss et Szalay, 2020). Cependant, la méthode Th-BCE 2020 impose une restriction de la vitesse nominale à 2,5 m/s ; on considère alors le dimensionnement suivant :

- Pour chaque bâtiment de 10 étages : 3 ascenseurs avec une capacité de 4 personnes et une vitesse nominale de 1,5 m/s
- Pour la tour de 30 étages : 7 ascenseurs avec une capacité de 15 personnes et avec une vitesse nominale de 2,5 m/s.

La consommation électrique annuelle calculée à partir de ces hypothèses est estimée à 4750 kWh/an par ascenseur dans les bâtiments de 10 étages, soit un total d'environ 42700 kWh/an consommés par les trois bâtiments pour le fonctionnement des ascenseurs. Les ascenseurs de la tour de 30 étages engendrent une consommation de 13400 kWh/an, soit un total de 93600 kWh par an. Ainsi, la consommation électrique des ascenseurs de la tour de 30 étages est environ deux fois plus élevée que la consommation de ce poste pour les bâtiments de 10 étages. Les émissions de GES engendrées par les matériaux et par la consommation électrique sont résumées sur la Figure 5-30. Le mix électrique utilisé est le mix marginal prospectif présenté au paragraphe 5.3.4.

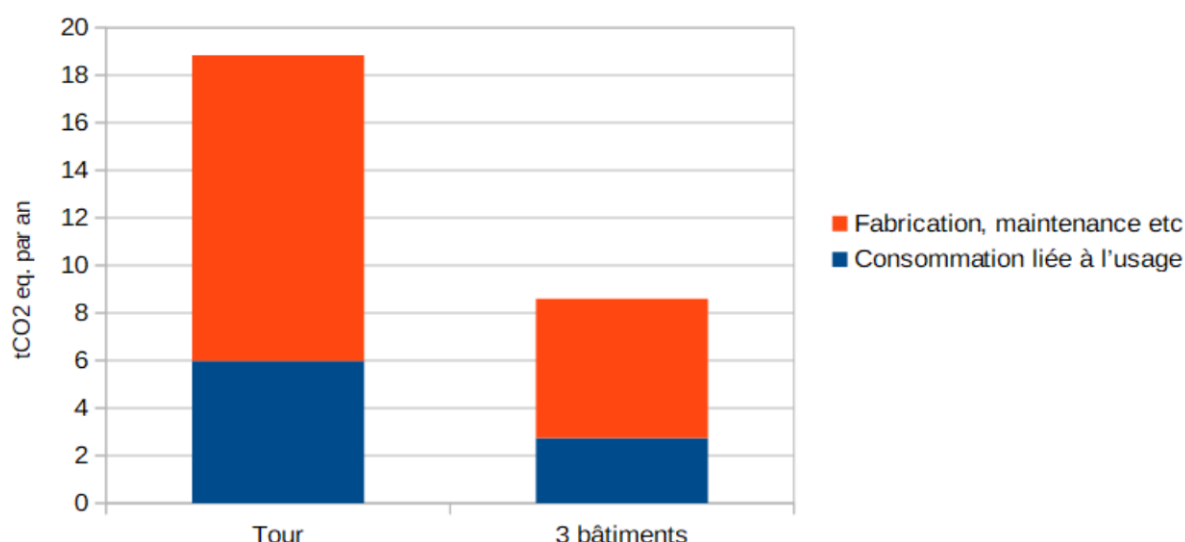


Figure 5-30 : Emissions de GES liées aux matériaux et à la consommation électrique des ascenseurs

5.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'étendre le système considéré pour le quartier et d'analyser la sensibilité des différentes hypothèses prises lors de l'optimisation environnementale d'un bâtiment, notamment en ce qui concerne les aspects liés aux comportements des occupants. Tout d'abord, la comparaison de deux systèmes de production de chaleur a montré l'influence du choix du système de chauffage. Une pompe à chaleur émet moins de GES que le réseau de chaleur dans le cas d'une approche attributionnelle, mais cette tendance peut s'inverser si une approche d'ACV conséquentielle est adoptée, en fonction également des scénarios prospectifs considérés. Une étude comparative a ainsi montré l'influence du mix électrique ; l'approche sélectionnée et l'année estimée influencent de manière importante la performance environnementale du projet. Le mix conséquentiel permettant de mieux tenir compte des conséquences du projet étudié sur le système d'arrière-plan, en particulier le système électrique, l'application de l'optimisation environnementale multicritère conséquentielle à un bâtiment de logements a été réalisée ; on a alors constaté l'influence de l'approche ACV sur l'aide à la décision.

Ensuite, la procédure d'optimisation a été appliquée à différents bâtiments du quartier afin de montrer d'une part, l'application du post-traitement permettant l'optimisation à l'échelle multibâtiment ; il s'agit de réaliser les optimisations séparément, puis de combiner les solutions non dominées des différentes optimisations. Cette procédure a été définie en cascade afin d'éviter un temps de calcul trop long, la complexité des calculs augmentant avec le nombre de données. D'autre part, l'optimisation d'un bâtiment de bureaux a montré la contribution des différents usages ; dans cette application la priorité pour réduire les émissions de GES des bâtiments de bureaux est de limiter la consommation d'électricité spécifique.

Enfin, les contributions de cette thèse ont été présentées d'une part à l'échelle du bâtiment et d'autre part l'échelle multibâtiment, pour s'intégrer dans un environnement plus large, l'échelle du quartier. Dans ce contexte plus large, différents autres secteurs sont responsables des impacts environnementaux, tels que les transports, l'alimentation ou encore la gestion des déchets ménagers. Sur ces aspects, les comportements des occupants du quartier influencent les résultats environnementaux concernant par exemple l'effectivité du recyclage, la consommation individuelle d'eau ou encore l'utilisation des modes doux. La contribution des ascenseurs, de l'implémentation de panneaux PV et de l'agriculture en toiture a été calculée, la quantification des émissions de GES provenant de ces trois postes permet d'étoffer l'évaluation environnementale des bâtiments. Cependant, lorsque l'ensemble du cycle vie du bâtiment est pris en compte, ces contributions sont relativement faibles ; il est alors important de prioriser les décisions les plus influentes sur les émissions de GES, tout en considérant chaque poste d'émissions. Nous remarquons que le gain obtenu par l'installation des panneaux PV en toiture est plus important que le gain relatif à la mise en place de l'agriculture, et ces deux installations ne sont pas compatibles sur une seule toiture. On pourrait alors choisir de prioriser l'installation PV, ou bien travailler sur une potentielle cohabitation des deux installations, choisissant des plantes qui ne nécessitent très peu d'ensoleillement par exemple.

Conclusion et perspectives

La réduction des impacts environnementaux des projets d'aménagement urbain, tout en assurant le confort des occupants, est primordiale dans le contexte actuel. L'ACV, en tant qu'outil d'écoconception, fournit une aide à la décision pour étudier des variantes à moindre impact, permettant de répondre aux enjeux énergétiques et environnementaux. Cette méthode doit être utilisée en phase amont des projets afin de fournir des recommandations avant que les décisions importantes soient prises. Les architectes et aménageurs ont besoin pour cela d'outils fiables et accessibles de simulation thermique dynamique et d'analyse de cycle de vie des bâtiments. De plus, certains objectifs s'avèrent parfois contradictoires, comme un coût d'investissement limité et une bonne performance énergétique et environnementale du bâtiment ; l'optimisation multicritère permet de trouver les meilleures solutions à partir d'un espace de recherche, permettant de guider les choix vers les variantes bâties correspondant à des compromis entre les différents critères. Enfin, un important levier d'action consiste à élargir les frontières du système afin de prendre des décisions à plus grand impact ; ainsi ces travaux de thèse ont concerné des outils à l'échelle multibâtiment, nous présenterons les principales contributions dans la suite.

Bilan du travail effectué

Un état de l'art sur l'écoconception des bâtiments et des quartiers, et sur l'optimisation environnementale multicritère a permis de présenter la méthode de l'ACV des bâtiments et les pratiques d'optimisation et de conception paramétrique appliquées aux ensembles bâtis. L'optimisation multicritère est de plus en plus utilisée pour améliorer la performance énergétique des bâtiments à moindre coût, mais les études considérant des objectifs environnementaux sont encore rares dans la littérature, notamment la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie et de différents indicateurs environnementaux. De plus, l'analyse des projets de grande envergure permet de maximiser les degrés de liberté. L'un des axes de recherche identifiés concerne donc l'optimisation environnementale multicritère des bâtiments à l'échelle de l'îlot. D'autre part, les décisions nécessitent d'être prises en phase amont, dès la définition du concept architectural car la forme des bâtiments et l'aménagement du quartier influencent leur performance, or les outils de simulation thermique et d'écoconception des bâtiments sont principalement destinés à un usage en bureau d'études après la phase de programmation. Le deuxième axe de recherche identifié concerne le développement d'un outil permettant aux architectes et aménageurs d'évaluer la performance environnementale des variantes de bâtiments proposées en phase esquisse.

Conclusion et perspectives

La réalisation des simulations thermiques et environnementales des bâtiments nécessite des outils de modélisation fiables et adaptés, intégrant les résultats récents issus de la recherche. Les outils nécessaires à l'optimisation environnementale d'un quartier ont été présentés ainsi que les différentes contributions à leur développement. La quantité de matériaux nécessaires à la structure des bâtiments doit être estimée afin de prendre en compte les impacts environnementaux associés. De plus, la réalisation d'une ACV nécessite la définition des objectifs, du cadre de l'étude et de l'ensemble des hypothèses associées à la simulation environnementale ; les choix méthodologiques effectués pour ces travaux de thèse ont été présentés dans le chapitre 2. Des références environnementales ont également été établies pour accompagner la phase d'interprétation des résultats de la méthode d'ACV constituant une base de comparaison pour différentes catégories de bâtiments. D'autre part, un îlot de bâtiments a été considéré comme étude de cas afin d'appliquer les démarches présentées au cours de cette thèse. Les caractéristiques thermiques et les hypothèses environnementales ont été détaillées.

Les bases nécessaires à la simulation thermique et à l'ACV ayant été établies, le développement d'une méthode d'optimisation environnementale multicritère multibâtiment est alors présenté. Il s'agit de compléter les travaux effectués sur l'algorithme d'optimisation intégré dans un outil existant afin de prendre en compte l'ensemble des impacts sur le cycle de vie des bâtiments, et de comparer deux méthodes permettant d'optimiser plusieurs bâtiments en parallèle afin de déterminer la plus performante. L'optimisation monobâtiment suivie d'un post traitement pour agréger les résultats à l'échelle multibâtiment a été sélectionnée suite à la mise en évidence de la performance de cette méthode. La convergence et la robustesse de la méthode ont été démontrées, et une méthode de détermination du paramétrage a été présentée. L'étude du paramétrage a permis de montrer que les paramètres de la littérature sont convenables, bien qu'il y ait la possibilité d'améliorer le comportement de l'algorithme en les modifiant. La détermination du paramétrage optimal nécessite cependant une méthode robuste approfondie. La méthode d'optimisation permet de définir les solutions non dominées au regard d'un critère environnemental et du coût d'investissement, une application a été réalisée sur les sept critères environnementaux déterminés au chapitre 2, comprenant des indicateurs de niveau *endpoint*, de niveau *midpoint* et des indicateurs de flux. Dans l'application de la méthode d'optimisation à ce cas d'étude comprenant un espace de décision réduit, la plupart des impacts environnementaux dépendent fortement des besoins de chauffage ; D'après ce résultat, l'amélioration de la performance énergétique doit donc être une priorité dans un tel projet d'aménagement urbain, cependant d'autres variables créent des impacts non négligeables tels que la consommation d'électricité spécifique et d'eau potable. Ces résultats sont cependant relatifs à l'étude de cas de cette thèse, l'application à d'autres projets d'aménagement et l'adaptation des hypothèses environnementales permettraient de proposer des préconisations pour orienter les décideurs vers les meilleurs compromis propres à chaque projet. La procédure d'optimisation à deux critères a ainsi été développée permettant désormais d'évaluer plusieurs bâtiments ; la possibilité d'ajouter une contrainte a également été étudiée au travers d'une application.

L'application de la méthode de l'ACV dès la phase amont des projets d'aménagement est primordiale, afin de guider les projets vers des variantes bâties à moindre impact ; cela nécessite des outils adaptés aux différents acteurs. Le concept architectural des bâtiments influence les besoins thermiques et les impacts environnementaux, mais il est défini dès les premières phases du projet et la modification des hypothèses devient de plus en plus onéreuse avec l'avancement du projet. Un outil a alors été développé dont l'objectif est de coupler un logiciel de modélisation 3D utilisé dans le domaine de l'architecture et permettant de réaliser des variations paramétriques avec un logiciel de simulation énergétique et environnementale du bâtiment ayant donné lieu à diverses études de validation en lien avec la communauté scientifique. Basée sur la méthodologie BIM, ce couplage permet l'accès d'une maquette numérique à différents acteurs en assurant la possibilité d'évaluer les impacts environnementaux des variantes modélisées lors de l'esquisse du projet. Le couplage est fonctionnel, il pourra être implémenté dans la version commerciale de l'outil afin d'être utilisé par les acteurs des projets d'écoconception.

La méthode d'optimisation environnementale des projets d'écoconception des ensembles bâtis a été appliquée à un cas d'étude dans le chapitre 5 et la procédure est complétée par des aspects supplémentaires. Il s'agit dans un premier temps des aspects liés à l'énergie, en particulier l'influence du choix de la production de chaleur, et la prise en compte de l'évolution dans le temps du mix de production d'électricité. Un autre aspect concerne la sensibilité des résultats aux paramètres comportementaux dans différents domaines outre les aspects énergétiques, dont la gestion des déchets, les consommations d'eau, du choix du mode de transport et les régimes alimentaires. La prise en compte des ascenseurs et d'une installation photovoltaïque a également été intégrée à cette étude de cas. Il s'avère que le choix du système de production de chaleur et de l'approche ACV influencent de manière importante les résultats de l'optimisation ; une pompe à chaleur émet moins de GES que le réseau de chaleur dans une approche attributionnelle, mais cette tendance peut s'inverser si une approche d'ACV conséquentielle est adoptée, en fonction également des scénarios prospectifs considérés pour le système électrique. L'application de la méthode à différents bâtiments du quartier a montré la contribution des différents usages : par exemple dans le cas des bâtiments de bureaux, la consommation d'électricité spécifique (bureautique, éclairage...) est un contributeur important.

Enfin, les contributions de cette thèse ont été développées d'une part à l'échelle du bâtiment d'autre part à l'échelle multibâtiment pour s'intégrer dans un environnement plus large, l'échelle quartier. Dans ce contexte, le bâtiment n'est plus le seul majoritairement responsable des impacts environnementaux, d'autres secteurs tels que le transport, l'alimentation ainsi que la gestion des déchets ménagers engendrent des impacts importants ; la réalisation d'analyses de sensibilité concernant le comportement des occupants a montré la possibilité de réduire ces impacts en incitant les occupants à changer leurs habitudes. L'installation d'une production d'électricité locale et l'implémentation de l'agriculture urbaine en toiture permettent également de réduire les impacts. Cependant, ramenés à l'ensemble du

cycle de vie d'un bâtiment, ces contributions deviennent relativement faibles ; les décisions les plus influentes sur les émissions de GES doivent donc être prioritaires, sans négliger les impacts de chaque poste d'émissions, qui, une fois accumulés, présentent une part d'émissions non négligeable.

Perspectives

Les perspectives de ces travaux de thèse sont nombreuses. Il serait tout d'abord utile de poursuivre le développement de la procédure d'optimisation à plusieurs critères environnementaux, pour permettre à l'utilisateur une vision globale du projet et encourager la prise en compte d'autres indicateurs que les émissions de gaz à effet de serre, indicateur introduit dans la réglementation environnementale récente RE2020 et le label E⁺C⁻. Ce développement est d'ores et déjà implémenté, il nécessiterait cependant d'approfondir l'analyse visuelle des résultats ; ces derniers peuvent être présentés de façon claire sur un front de Pareto à deux voire trois critères, mais au-delà l'interprétation des résultats semble difficile. L'analyse de ces résultats à l'aide d'un outil d'analyse visuelle interactive comme EvoGraphDice serait intéressante. De plus, la pertinence de l'algorithme d'optimisation NSGA-II devra être questionnée avec l'ajout de critères, la performance de l'algorithme pourra être comparée avec celle de l'algorithme NSGA-III. Enfin, la prise en compte de plusieurs critères environnementaux ne permet pas pour autant de s'affranchir du coût de construction des bâtiments, qui représente une contrainte importante à chaque projet ; cet outil d'optimisation minimisant les impacts environnementaux et le coût d'investissement permet de sensibiliser les concepteurs et aménageurs et de les inciter à réduire les impacts.

L'optimisation environnementale nécessite cependant d'accompagner les acteurs des projets d'aménagement urbain sur l'interprétation des résultats ; tandis qu'il nous semble indispensable de présenter les impacts relatifs aux indicateurs de flux et au changement climatique, ce sont les indicateurs de niveau *endpoint* qui représentent le mieux les impacts au niveau global. Il est nécessaire de différencier ces indicateurs et de les présenter de façon à éviter le double comptage.

L'espace de décision de l'optimisation multicritère est restreint dans les applications de la méthode présentées dans ces travaux de thèse, mais les différentes contributions permettront de l'élargir ; tandis que seule la performance énergétique est optimisée par la prise en compte de différentes épaisseurs d'isolant et de différents types de fenêtres et tailles d'ouvertures comme variables de décision, l'optimisation pourra désormais prendre en compte différentes formes de bâtiments ainsi que les fondations correspondantes, varier les hypothèses environnementales pour considérer par exemple l'intérêt d'utiliser des composants provenant de forêts certifiées à travers le calcul du carbone biogénique ou encore intégrer une production d'électricité locale ainsi que l'agriculture urbaine.

Le paramétrage de la méthode d'optimisation a fait l'objet d'une étude spécifique afin de déterminer les valeurs optimales, cependant cette dernière devra être poursuivie pour s'assurer de sa robustesse. D'autres méthodes de paramétrage peuvent être intégrées à cette procédure, comme un paramétrage adaptatif ou auto-adaptatif. Le paramétrage optimal pourra donner lieu à la réduction du temps de calcul,

en modifiant le critère d'arrêt. D'une part le nombre de générations pourra être réduit si la convergence est atteinte plus tôt. D'autre part, le critère d'arrêt peut être remplacé par un calcul utilisant par exemple l'hypervolume, et ainsi arrêter l'optimisation dès que le critère de convergence est atteint. Cela permettra de s'affranchir du choix du nombre de générations en amont de la procédure, un paramètre qui n'est pas maîtrisé par l'utilisateur et engendre un risque de stopper les calculs avant l'atteinte de la convergence, ou au contraire de continuer les calculs après la convergence ce qui augmente inutilement les temps de calculs.

Une étude de faisabilité concernant le couplage entre les outils de modélisation 3D et de variation paramétrique, et de simulation thermique et d'écoconception des bâtiments a été effectuée. Ce travail permettra l'implémentation du développement dans la version commerciale des logiciels, moyennant une automatisation de ce couplage. Ainsi, la conception paramétrique pourrait être implémentée dans la procédure d'optimisation multicritère qui serait considérablement enrichie.

L'évaluation environnementale des projets d'aménagement urbain représente un outil important pour évaluer l'intérêt des leviers d'action ; l'optimisation de l'aménagement du quartier, notamment par l'intermédiaire de la conception paramétrique permet de réduire les impacts. De nombreuses décisions à l'échelle quartier permettent d'améliorer la performance environnementale d'un quartier, à commencer par la réduction de la distance entre les bâtiments de bureaux et les transports en communs afin que les employés privilégient ce mode de transport au détriment de la voiture individuelle, l'installation d'une production locale d'électricité et le choix d'un système de production de chaleur à moindre impact adapté au contexte dans lequel est conçu le quartier ; l'optimisation de la forme des bâtiments et de leur emplacement pour améliorer la performance énergétique des bâtiments tout en prenant en compte l'influence de la forme sur les quantités de matériaux nécessaires à la structure du bâti et à l'installation des ascenseurs, ainsi que la consommation d'énergie associée. L'élargissement des frontières du système à l'échelle quartier constitue une voie de progrès importante permettant une aide à la décision globale pouvant réduire considérablement les impacts d'un projet.

Références bibliographiques

ABOLGHASSEM TEHRANI, M. et FROESE, T., 2017. A comparative life cycle assessment of tall buildings with alternative structural system : wood VS concrete. In : . Vancouver, Canada : s.n. 2017. p. 11.

ADEME, 2018. *Les chiffres clés du bâtiment - Edition 2018*. S.l. Agence De l'Environnement et Maitrise de l'Energie.

ADEME et CODA STRATEGIES, 2021. *La climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires* [en ligne]. Etat des Lieux 2020 - Synthèse. S.l. Disponible à l'adresse : <https://librairie.ademe.fr/>.

ANSES, 2017. *Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3). Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Édition scientifique*. Maisons-Alfort, France. Ministère des solidarités et de la santé, Ministère de l'agriculture et de l'alimentation.

ASCIONE, F.,BIANCO, N.,MAURO, G. M. et VANOLI, G. P., 2019. A new comprehensive framework for the multi-objective optimization of building energy design: Harlequin. In : *Applied Energy*. 2019. Vol. 241, p. 331-361. DOI 10.1016/j.apenergy.2019.03.028. Scopus

ATTIA, S.,HAMDY, M.,O'BRIEN, W. et CARLUCCI, S., 2013. Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. In : *Energy and Buildings*. mai 2013. Vol. 60, p. 110-124. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.01.016.

AUDARD, G., 2016. *Evaluation des impacts environnementaux d'un projet de renforcement du réseau électrique de transport par analyse de cycle de vie conséquentielle*. Thèse de doctorat. S.l. : Mines ParisTech.

AUGISEAU, V. et BARLES, S., 2017. Studying construction materials flows and stock: A review. In : *Resources, Conservation and Recycling*. 1 août 2017. Vol. 123, p. 153-164. DOI 10.1016/j.resconrec.2016.09.002.

BAITZ, M.,ALBRECHT, S.,BRAUNER, E.,BROADBENT, C.,CASTELLAN, G.,CONRATH, P.,FAVA, J.,FINKBEINER, M.,FISCHER, M.,FULLANA I PALMER, P.,KRINKE, S.,LEROY, C.,LOEBEL, O.,MCKEOWN, P.,MERSIOWSKY, I.,MÖGINGER, B.,PFAADT, M.,REBITZER, G.,ROTHER, E.,RUHLAND, K.,SCHANSSEMA, A. et TIKANA, L., 2013. LCA's theory and practice: like ebony and ivory living in perfect harmony? In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 janvier 2013. Vol. 18, n° 1, p. 5-13. DOI 10.1007/s11367-012-0476-x.

Références bibliographiques

- BANDE, L.,ALSHAMSI, A.,ALHEFEITI, A.,ALDEREI, S.,SHABAN, S.,ALBATTAH, M. et SCOPPA, M. D., 2021. Parametric design structures in low rise buildings in relation to the urban context in UAE. In : *Sustainability (Switzerland)*. 2021. Vol. 13, n° 15. DOI 10.3390/su13158595. Scopus
- BARICHARD, V., 2003. *Approches hybrides pour les problèmes multiobjectifs* [en ligne]. Thèse de doctorat. S.l. : Angers. Disponible à l'adresse : <http://www.theses.fr/2003ANGE0027>.
- BASIC, S.,HOLLBERG, A.,GALIMSHINA, A. et HABERT, G., 2019. A design integrated parametric tool for real-time Life Cycle Assessment - Bombyx project. In : . S.l. : s.n. 2019. Scopus
- BESSEAU, R., 2019. *Analyse de cycle de vie de scénarios énergétiques intégrant la contrainte d'adéquation temporelle production-consommation* [en ligne]. phdthesis. S.l. : Université Paris sciences et lettres. [Consulté le 25 mai 2022]. Disponible à l'adresse : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-02732972>.
- BLENGINI, G. A. et DI CARLO, T., 2010. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. In : *Energy and Buildings*. 1 juin 2010. Vol. 42, n° 6, p. 869-880. DOI 10.1016/j.enbuild.2009.12.009.
- BOUKHELIFA, N.,CANCINO, W.,BEZERIANOS, A. et LUTTON, E., 2013. Evolutionary Visual Exploration: Evaluation With Expert Users. In : *Computer Graphics Forum*. 2013. Vol. 32, n° 3pt1, p. 31-40. DOI 10.1111/cgf.12090.
- BRANKE, J.,DEB, K.,MIETTINEN, K. et SLOWINSKI, R., 2008. *Multiobjective optimization: Interactive and evolutionary approaches*. S.l. : Springer Science & Business Media.
- BROEKHOFF, D., 2007. *Guidelines for Quantifying GHG Reductions from Grid-Connected Electricity Projects* [en ligne]. S.l. [Consulté le 20 juillet 2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.wri.org/research/guidelines-quantifying-ghg-reductions-grid-connected-electricity-projects>.
- BULLE, C.,MARGNI, M.,PATOULLARD, L.,BOULAY, A.-M.,BOURGAULT, G.,DE BRUILLE, V.,CAO, V.,HAUSCHILD, M.,HENDERSON, A.,HUMBERT, S.,KASHEF-HAGHIGHI, S.,KOUNINA, A.,LAURENT, A.,LEVASSEUR, A.,LIARD, G.,ROSENBAUM, R. K.,ROY, P.-O.,SHAKED, S.,FANTKE, P. et JOLLIET, O., 2019. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. In : *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2019. Vol. 24, n° 9, p. 1653-1674. DOI 10.1007/s11367-019-01583-0. Scopus
- CHRISTENSEN, T. H.,GENTIL, E.,BOLDRIAN, A.,LARSEN, A. W.,WEIDEMA, B. P. et HAUSCHILD, M., 2009. C balance, carbon dioxide emissions and global warming potentials in LCA-modelling of waste management systems. In : *Waste Management & Research*. 1 novembre 2009. Vol. 27, n° 8, p. 707-715. DOI 10.1177/0734242X08096304.
- COSTA-CARRAPIÇO, I.,RASLAN, R. et GONZÁLEZ, J. N., 2020. A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. In : *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 210. DOI 10.1016/j.enbuild.2019.109690. Scopus
- DE WOLF, C.,YANG, F.,COX, D.,CHARLSON, A.,HATTAN, A. S. et OCHSENDORF, J., 2016. Material quantities and embodied carbon dioxide in structures. In : *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*. août 2016. Vol. 169, n° 4, p. 150-161. DOI 10.1680/ensu.15.00033.
- DEB, K., 2001. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. S.l. : John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-87339-6.

- DEB, K., 2011. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms - An Introduction. In : *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Indian Institute of Technology Kanpur Kanpur, PIN 208016, India : s.n.
- DEB, K. et JAIN, H., 2012. Handling many-objective problems using an improved NSGA-II procedure. In : *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. S.l. : s.n. juin 2012. p. 1-8.
- DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S. et MEYARIVAN, T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 6, n° 2, p. 182-197. DOI 10.1109/4235.996017. Scopus
- DEB, K., PRATAP, A. et MOITRA, S., 2000. Mechanical component design for multiple objectives using elitist non-dominated sorting GA. In : *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2000. Vol. 1917, p. 859-868. Scopus
- DE OÑA, J., ESTÉVEZ, E. et DE OÑA, R., 2021. How does private vehicle users perceive the public transport service quality in large metropolitan areas? A European comparison. In : *Transport Policy*. 2021. Vol. 112, p. 173-188. DOI 10.1016/j.tranpol.2021.08.005. Scopus
- DORR, E., FRANÇOIS, C., POULHES, A. et WURTZ, A., 2022. A life cycle assessment method to support cities in their climate change mitigation strategies. In : *Sustainable Cities and Society*. 2022.
- DORR, E., GOLDSTEIN, B., HORVATH, A., AUBRY, C. et GABRIELLE, B., 2021. Environmental impacts and resource use of urban agriculture: a systematic review and meta-analysis. In : *Environmental Research Letters*. août 2021. Vol. 16, n° 9, p. 093002. DOI 10.1088/1748-9326/ac1a39.
- ECOINVENT, 2010. *International Reference Life Cycle Data System Handbook*. S.l. : s.n. Ecoinvent Data v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. www.ecoinvent.chILCD. 2010.
- EKVALL, T. et TILLMAN, A.-M., 1997. Open-loop recycling: Criteria for allocation procedures. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 septembre 1997. Vol. 2, n° 3, p. 155. DOI 10.1007/BF02978810.
- EKVALL, T. et WEIDEMA, B. P., 2004. System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. In : *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2004. Vol. 9, n° 3, p. 161-171. DOI 10.1007/BF02994190. Scopus
- EMSD, 2007. Guidelines on Energy Efficiency of Lift & Escalator Installations 2007 Edition. In : . 2007. p. 31.
- EUROPEAN COMMISSION, 2021. *Recommendation on the use of Environmental Footprint methods* [en ligne]. S.l. Disponible à l'adresse : https://environment.ec.europa.eu/publications/recommendation-use-environmental-footprint-methods_en.
- EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY, 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook : specific guide for Life Cycle Inventory (LCI) data sets*. [en ligne]. LU : Publications Office. [Consulté le 25 mars 2022]. Disponible à l'adresse : <https://data.europa.eu/doi/10.2788/39726>.
- EUROPEAN COMMISSION, JOINT RESEARCH CENTRE (EUROPEAN COMMISSION), CASTELLANI, V., SALA, S. et FUSI, A., 2018. *Consumer footprint: basket of products indicator on food* [en ligne]. LU : Publications Office of the European Union.

Références bibliographiques

[Consulté le 20 juillet 2022]. ISBN 978-92-79-73194-5. Disponible à l'adresse : <https://data.europa.eu/doi/10.2760/668763>. KJ-NA-28764-EN-N

EUROPEAN COMMISSION, JOINT RESEARCH CENTRE et INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY, 2012. *Product Environmental Footprint (PEF) Guide*. S.l. : s.n.

EVINS, R., 2013. A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 22, p. 230-245.

FRANÇOIS, C. et COULOMBEL, N., 2021. Écoconception de la mobilité à l'échelle d'un quartier : première étape de diagnostic. In : . Univ. Gustave Eiffel, Champs-sur-Marne : s.n. 2 juin 2021.

FRAPIN, M., ROUX, C., ASSOUMOU, E. et PEUPORTIER, B., 2022. Modelling long-term and short-term temporal variation and uncertainty of electricity production in the life cycle assessment of buildings. In : *Applied Energy*. 1 février 2022. Vol. 307, p. 118141. DOI 10.1016/j.apenergy.2021.118141.

FRISCHKNECHT, R., BIRGISDOTTIR, H., CHAE, C. U., LÜTZKENDORF, T., PASSER, A., ALSEMA, E., BALOUKTSI, M., BERG, B., DOWDELL, D., GARCÍA MARTÍNEZ, A., HABERT, G., HOLLBERG, A., KÖNIG, H., LASVAUX, S., LLATAS, C., RASMUSSEN, F. N., PEUPORTIER, B., RAMSEIER, L., RÖCK, M., VERDAGUER, S., SZALAY, Z., BOHNE, R. A., BRAGANÇA, L., CELLURA, M., CHAU, C. K., DIXIT, M., FRANCART, N., GOMES, V., HUANG, L., LONGO, S., LUPÍŠEK, A., MARTEL, J., MATEUS, R., OUELLET-PLAMONDON, C., POMPONI, F., RYKLOVÁ, P., TRIGAUX, D. et YANG, W., 2019. Comparison of the environmental assessment of an identical office building with national methods. In : *Sustainable Built Environment Conference 2019* [en ligne]. Graz, Austria : s.n. septembre 2019. [Consulté le 27 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02173848>.

FRISCHKNECHT, R., RAMSEIER, L., YANG, W., BIRGISDOTTIR, H., CHAE, C. U., LÜTZKENDORF, T., PASSER, A., BALOUKTSI, M., BERG, B., BRAGANÇA, L., BUTLER, J., CELLURA, M., DIXIT, M., DOWDELL, D., FRANCART, N., MARTÍNEZ, A. G., GOMES, V., SILVA, M. G. D., GUIMARAES, G., HOXHA, E., WIJK, M. K., KÖNIG, H., LLATAS, C., LONGO, S., LUPÍŠEK, A., MARTEL, J., MATEUS, R., RASMUSSEN, F. N., OUELLET-PLAMONDON, C., PEUPORTIER, B., POMPONI, F., PULGROSSI, L., RÖCK, M., SATOLA, D., VERDAGUER, B. S., SZALAY, Z., NHU, A. T., VESELKA, J., VOLF, M. et ZARA, O., 2020. Comparison of the greenhouse gas emissions of a high-rise residential building assessed with different national LCA approaches – IEA EBC Annex 72. In : *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. novembre 2020. Vol. 588, n° 2, p. 022029. DOI 10.1088/1755-1315/588/2/022029.

FRISCHKNECHT, R. et STUCKI, M., 2010. Scope-dependent modelling of electricity supply in life cycle assessments. In : *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2010. Vol. 15, n° 8, p. 806-816. DOI 10.1007/s11367-010-0200-7. Scopus

FROSSARD, M., 2020. *Optimisation robuste multicritère pour l'écoconception de bâtiments zéro-énergie*. Thèse de doctorat. S.l. : PSL - Mines ParisTech.

FROSSARD, M. et PEUPORTIER, B., 2021. *Indicateurs ACV et méthodes - EQUER*. S.l. Mines ParisTech.

GOBIN, C., 2010. *Réussir une construction en éco-conception*. S.l. : Presses des Mines.

GOEDKOOPE, M., HEIJUNGS, R. et HUIJBREGTS, M., 2013. ReCiPE 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. In : . 2013. p. 134.

- GOLDBERG, D. E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. 1st. USA : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. ISBN 978-0-201-15767-3.
- GRABOWSKA, A., WURTZ, A., FERRY, A., TRUONG NHU, A. et PEUPORTIER, B., 2021. *Valeurs de référence pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments*. S.l. Mines ParisTech, CES.
- GUINÉE, J. B., GORRÉE, M., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., KLEIJN, R., DE KONING, A., VAN OERS, L., SLEESWIJK, A. W., SUH, S., UDO DE HAES, H. A., DE BRUIJN, H., VAN DUIN, R., HUIJBREGTS, M. A. J., LINDEIJER, E., ROORDA, A. A. H., VAN DER VEN, B. L. et WEIDEMA, B. P., 2001. *LCA - An operational guide to the ISO standards*. S.l. Centre of Environmental Science - Leiden University (CML).
- GUINÉE, J. B., HEIJUNGS, R. et VAN DER VOET, E., 2009. A greenhouse gas indicator for bioenergy: some theoretical issues with practical implications. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 juin 2009. Vol. 14, n° 4, p. 328-339. DOI 10.1007/s11367-009-0080-x.
- HASHEMPOUR, N., TAHERKHANI, R. et MAHDIKHANI, M., 2020. Energy performance optimization of existing buildings: A literature review. In : *Sustainable Cities and Society*. 1 mars 2020. Vol. 54, p. 101967. DOI 10.1016/j.scs.2019.101967.
- HEIJUNGS, R., 2010. Sensitivity coefficients for matrix-based LCA. In : *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2010. Vol. 15, n° 5, p. 511-520. DOI 10.1007/s11367-010-0158-5. Scopus
- HEIJUNGS, R. et KLEIJN, R., 2001. Numerical approaches towards life cycle interpretation five examples. In : *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2001. Vol. 6, n° 3, p. 141-148. DOI 10.1007/BF02978732. Scopus
- HERFRAY, G., 2011. *Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers* [en ligne]. Thèse de doctorat. S.l. : École Nationale Supérieure des Mines de Paris. [Consulté le 3 décembre 2012]. Disponible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00658220/>.
- HISCHIER, R., WEIDEMA, B., ALTHAUS, H.-J., BAUER, C., DOKA, G., DONES, R., FRISCHKNECHT, R., HELLWEG, S., HUMBERT, S., JUNGBLUTH, N., KÖLLNER, T., LOERINCIK, Y., MARGNI, M. et NEMECEK, T., 2010. 3 : *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*. St Gallen, Switzerland. Ecoinvent.
- HOLLBERG, A. et RUTH, J., 2016. LCA in architectural design—a parametric approach. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. juillet 2016. Vol. 21, n° 7, p. 943-960. DOI 10.1007/s11367-016-1065-1.
- HUIJBREGTS, M. A. J., STEINMANN, Z. J. N., ELSHOUT, P. M. F., STAM, G., VERONES, F., VIEIRA, M., ZIJP, M., HOLLANDER, A. et VAN ZELM, R., 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. février 2017. Vol. 22, n° 2, p. 138-147. DOI 10.1007/s11367-016-1246-y.
- IPCC, 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In : *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press.
- ISO 14044, 2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. In : [en ligne]. 2006. Disponible à l'adresse : <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>.

Références bibliographiques

- KIM, H.-J.,CHOI, W.-S. et KIM, J.-W., 2021. A study on parametric design tool for residential buildings securing valid sunlight hours on the winter solstice. In : *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2021. DOI 10.1080/13467581.2021.2007108. Scopus
- KISS, B. et SZALAY, Z., 2020. Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings. In : *Automation in Construction*. 1 mars 2020. Vol. 111, p. 103044. DOI 10.1016/j.autcon.2019.103044.
- KISTELEGI, I.,HORVÁTH, K. R.,STORCZ, T. et ERCSEY, Z., 2022. Building Geometry as a Variable in Energy, Comfort, and Environmental Design Optimization—A Review from the Perspective of Architects. In : *Buildings*. janvier 2022. Vol. 12, n° 1, p. 69. DOI 10.3390/buildings12010069.
- KNOWLES, J. et CORNE, D., 2002. On metrics for comparing nondominated sets. In : *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02 (Cat. No.02TH8600)*. S.l. : s.n. mai 2002. p. 711-716 vol.1.
- KOZIEL, S. et YANG, X.-S. (éd.), 2011. *Computational Optimization, Methods and Algorithms* [en ligne]. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. [Consulté le 23 mai 2022]. Studies in Computational Intelligence. ISBN 978-3-642-20858-4. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-20859-1>.
- LAMÉ, G.,LEROY, Y. et YANNOU, B., 2017. Ecodesign tools in the construction sector: Analyzing usage inadequacies with designers' needs. In : *Journal of Cleaner Production*. 1 avril 2017. Vol. 148, p. 60-72. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.01.173.
- LEJEUNE, Z.,CHEVAU, T. et TELLER, J., 2013. La qualité du logement comme variable environnementale : l'exemple de la région urbaine de Liège (Wallonie): In : *Flux*. 8 janvier 2013. Vol. N° 89-90, n° 3, p. 30-45. DOI 10.3917/flux.089.0030.
- LEVASSEUR, A.,LESAGE, P.,MARGNI, M. et SAMSON, R., 2013. Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment. In : *Journal of Industrial Ecology*. 2013. Vol. 17, n° 1, p. 117-128. DOI 10.1111/j.1530-9290.2012.00503.x.
- LLOYD, P. et SCOTT, P., 1995. Difference in Similarity: Interpreting the Architectural Design Process: In : *Environment and Planning B: Planning and Design* [en ligne]. 1995. [Consulté le 23 mai 2022]. DOI 10.1068/b220383. Disponible à l'adresse : <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/b220383>. Sage UK: London, England
- LOTTEAU, M.,LOUBET, P.,POUSSE, M.,DUFASNES, E. et SONNEMANN, G., 2015. Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. In : *Building and Environment*. 1 novembre 2015. Vol. 93, p. 165-178. DOI 10.1016/j.buildenv.2015.06.029.
- LU, K.,JIANG, X.,TAM, V. W. Y.,LI, M.,WANG, H.,XIA, B. et CHEN, Q., 2019. Development of a Carbon Emissions Analysis Framework Using Building Information Modeling and Life Cycle Assessment for the Construction of Hospital Projects. In : *Sustainability*. janvier 2019. Vol. 11, n° 22, p. 6274. DOI 10.3390/su11226274.
- LUND, H.,MATHIESEN, B. V.,CHRISTENSEN, P. et SCHMIDT, J. H., 2010. Energy system analysis of marginal electricity supply in consequential LCA. In : *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2010. Vol. 15, n° 3, p. 260-271. DOI 10.1007/s11367-010-0164-7. Scopus
- LUTTON, E., 2004. Darwinisme artificiel: une vue d'ensemble. In : *Traitement du Signal, numéro spécial" Gestion intelligente de senseurs*. 2004.

MACHAIRAS, V., TSANGRASSOULIS, A. et AXARLI, K., 2014. Algorithms for optimization of building design: A review. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 31, p. 101-112.

MANNI, M. et NICOLINI, A., 2022. Multi-Objective Optimization Models to Design a Responsive Built Environment: A Synthetic Review. In : *Energies*. janvier 2022. Vol. 15, n° 2, p. 486. DOI 10.3390/en15020486.

MENDES, B., 2022. *Influence de la forme et du choix de matériaux de structure sur la performance environnementale des quartiers en phase amont*. S.l.

MUNARETTO, F., 2014. *Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments* [en ligne]. Thèse de doctorat. S.l. : École nationale supérieure des mines de Paris. [Consulté le 9 octobre 2014]. Disponible à l'adresse : <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01068784>.

MURRAY, C. J. L. et LOPEZ, A. D., 1996. *The Global burden of disease : a comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries, and risk factors in 1990 and projected to 2020 : summary* [en ligne]. S.l. World Health Organization, World Bank and Harvard School of Public Health. [Consulté le 14 juillet 2022]. Disponible à l'adresse : <https://apps.who.int/iris/handle/10665/41864>.

NEMATCHOUA, M. K., ASADI, S. et REITER, S., 2020. A study of life cycle assessment in two old neighbourhoods in Belgium. In : *Sustainable Cities and Society*. 1 janvier 2020. Vol. 52, p. 101744. DOI 10.1016/j.scs.2019.101744.

NICHOLSON, A. L., OLIVETTI, E. A., GREGORY, J. R., FIELD, F. R. et KIRCHAIN, R. E., 2009. End-of-life LCA allocation methods: Open loop recycling impacts on robustness of material selection decisions. In : *2009 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*. S.l. : s.n. mai 2009. p. 1-6.

OKASHA, A., MÜLLER, N. et DEB, K., 2022. Bi-objective optimization of transcritical CO2 heat pump systems. In : *Energy*. 2022. Vol. 247. DOI 10.1016/j.energy.2022.123469. Scopus

OLIVER-SOLÀ, J., JOSA, A., ARENA, A. P., GABARRELL, X. et RIERADEVALL, J., 2011. The GWP-Chart: An environmental tool for guiding urban planning processes. Application to concrete sidewalks. In : *Cities*. 1 juin 2011. Vol. 28, n° 3, p. 245-250. DOI 10.1016/j.cities.2011.01.003.

OSTERTAG, A., DAZER, M., BERTSCHE, B., SCHLEGL, F., ALBRECHT, S., LEISTNER, P., GIENGER, A., WAGNER, J., TARÍN, C. et SAWODNY, O., 2020. Reliable Design of Adaptive Load-Bearing Structures with Focus on Sustainability. In : *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference* [en ligne]. S.l. : Research Publishing Services. 2020. p. 4703-4710. [Consulté le 12 mai 2022]. Disponible à l'adresse : <http://rpsonline.com.sg/proceedings/9789811485930/html/3806.xml>.

OYARZO, J. et PEUPORTIER, B., 2014. Life cycle assessment model applied to housing in Chile. In : [en ligne]. 15 avril 2014. [Consulté le 27 novembre 2019]. Disponible à l'adresse : <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01299402>.

PALACIOS-MUNOZ, B., PEUPORTIER, B., GRACIA-VILLA, L. et LÓPEZ-MESA, B., 2019. Sustainability assessment of refurbishment vs. new constructions by means of LCA and durability-based estimations of buildings lifespans: A new approach. In : *Building and Environment*. 2019. Vol. 160. DOI 10.1016/j.buildenv.2019.106203. Scopus

Références bibliographiques

PANNIER, M.-L., RECHT, T., ROBILLART, M., SCHALBART, P., PEUPORTIER, B. et MORA, L., 2021. Identifying optimal renovation schedules for building portfolios: Application in a social housing context under multi-year funding constraints. In : *Energy and Buildings*. novembre 2021. Vol. 250, p. 111290. DOI 10.1016/j.enbuild.2021.111290.

PATOUILLARD, L., LORNE, D., COLLET, P., BULLE, C. et MARGNI, M., 2020. Prioritizing regionalization to enhance interpretation in consequential life cycle assessment: application to alternative transportation scenarios using partial equilibrium economic modeling. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 décembre 2020. Vol. 25, n° 12, p. 2325-2341. DOI 10.1007/s11367-020-01785-x.

PATUREAU, R., TRAN, C. T., GAVAN, V. et STABAT, P., 2021. The new generation of District heating & cooling networks and their potential development in France. In : *Energy*. 1 décembre 2021. Vol. 236, p. 121477. DOI 10.1016/j.energy.2021.121477.

PAWLAK, S., PEUPORTIER, B., SAADÉ, M., ERRADHOUANI, B. et ROUX, C., 2020. *PULSE-PARIS*. Livrable 3. S.l. ADEME.

PEI, L., 2020. *Evaluation of environmental impacts of buildings in China*. Thèse de doctorat. S.l. : PSL - Mines ParisTech.

PEUPORTIER, B., 2008. *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*. S.l. : Les Presses MINES ParisTech. ISBN 978-2-35671-010-9.

PEUPORTIER, B., AGGERI, F., AGUILERA, V., AW, T., HOUDA, B., CHANDAKAS, E., COMBES, F., COULOMBEL, N., FAVRE, B., FÉRAILLE, A., FRASCARIA, N., GILLIOT, J.-M., GOMES RIVALLAIN, F., HENRY, A., HERFRAY, G., KOTELNIKOVA, N., LEURENT, F., LI, S., MICHELIN, J., MILLAN-LOPEZ, S., PINHEIRO-CROISEL, R., POULHÈS, A., RIVALLAIN, M., ROGER-ESTRADE, J., TARDIVEL, Y., TROCMÉ, M. et VORGER, E., 2013. *Ecoconception des ensembles bâtis et des infrastructures*. S.l. : Presses de l'Ecole des Mines. ISBN 978-2-35671-065-9.

PEUPORTIER, B., KELLENBERGER, D., ANINK, D., MÖTZL, H., ANDERSON, J., VARES, S., CHEVALIER, J. et KÖNIG, H., 2004. Inter-comparison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools. In : [en ligne]. Rotterdam : s.n. 2004. [Consulté le 20 juillet 2022]. Disponible à l'adresse : <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB2844.pdf>.

PEUPORTIER, B., LEURENT, F. et ESTRADE, J.-R., 2018. *Éco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures, tome 2* [en ligne]. Paris : Presses des Mines. [Consulté le 25 mai 2022]. Développement durable. Disponible à l'adresse : <https://www.pressesdesmines.com/produit/eco-conception-des-ensembles-batis-et-des-infrastructures-2/>.

PEUPORTIER, B. et SOMMEREUX, I. B., 1990. Simulation Tool with Its Expert Interface for the Thermal Design of Multizone Buildings. In : *International Journal of Solar Energy*. 1 janvier 1990. Vol. 8, n° 2, p. 109-120. DOI 10.1080/01425919008909714.

POLI, R., LANGDON, W. B., MCPHEE, N. F. et KOZA, J. R., 2008. *A field guide to genetic programming*. Morrisville, NC : Lulu Press. ISBN 978-1-4092-0073-4.

POLSTER, B., 1995. *Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie*. Thèse de doctorat. S.l. : École nationale supérieure des mines de Paris.

POLSTER, B., PEUPORTIER, B., BLANC SOMMEREUX, I., DIAZ PEDREGAL, P., GOBIN, C. et DURAND, E., 1996. Evaluation of the environmental quality of buildings towards a more environmentally conscious design. In : *Solar Energy*. 1 septembre 1996. Vol. 57, n° 3, p. 219-230. DOI 10.1016/S0038-092X(96)00071-0.

QIN, X.,ZHANG, F.,ZHANG, D.,GAO, Z. et TANG, S., 2022. Experimental and theoretical analysis of the optimal high pressure and peak performance coefficient in transcritical CO2 heat pump. In : *Applied Thermal Engineering*. 2022. Vol. 210. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2022.118372. Scopus

RECHT, T., 2016. *Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive* [en ligne]. Thèse de doctorat. Paris : École nationale supérieure des mines de Paris. Disponible à l'adresse : <https://www.theses.fr/2016PSLEM024>.

REINHART, C. F.,DOGAN, T.,JAKUBIEC, J. A.,RAKHA, T. et SANG, A., 2013. UMI - An urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability. In : . S.l. : s.n. 2013. p. 476-483. Scopus

RIVALLAIN, M., 2013. *Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants* [en ligne]. S.l. : s.n. [Consulté le 28 novembre 2019]. Disponible à l'adresse : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00861172>.

ROUX, C., 2016. *Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis*. Thèse de doctorat. S.l. : MINES ParisTech.

SANER, D.,VADENBO, C.,STEUBING, B. et HELLWEG, S., 2014. Regionalized LCA-Based Optimization of Building Energy Supply: Method and Case Study for a Swiss Municipality. In : *Environmental Science & Technology*. juillet 2014. Vol. 48, n° 13, p. 7651-7659. DOI 10.1021/es500151q.

SCHWARTZ, Y.,RASLAN, R. et MUMOVIC, D., 2016. Implementing multi objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimisation: A building refurbishment case study. In : *Energy*. 2016. Vol. 97, p. 58-68. DOI 10.1016/j.energy.2015.11.056. Scopus

STEPHAN, A.,CRAWFORD, R. H. et DE MYTTENAERE, K., 2013. Multi-scale life cycle energy analysis of a low-density suburban neighbourhood in Melbourne, Australia. In : *Building and Environment*. 1 octobre 2013. Vol. 68, p. 35-49. DOI 10.1016/j.buildenv.2013.06.003.

SUNG, W. et JEONG, Y., 2022. Site planning automation of apartment complex through grid-based calculation in grasshopper. In : *Automation in Construction*. 1 juin 2022. Vol. 138, p. 104216. DOI 10.1016/j.autcon.2022.104216.

TAM, V. WY.,ZHOU, Y.,ILLANKOON, C. et LE, K. N., 2022. A critical review on BIM and LCA integration using the ISO 14040 framework. In : *Building and Environment*. 1 avril 2022. Vol. 213, p. 108865. DOI 10.1016/j.buildenv.2022.108865.

TELLER, J., 2010. Développement de l'entre-soi communautaire dans les espaces résidentiels périurbains. In : *Déviance et Société*. 4 janvier 2010. Vol. Vol. 33, n° 4, p. 547-556. DOI 10.3917/ds.334.0547.

TILLMAN, A.-M., 2000. Significance of decision-making for LCA methodology. In : *Environmental Impact Assessment Review*. février 2000. Vol. 20, n° 1, p. 113-123. DOI 10.1016/S0195-9255(99)00035-9.

TIRUTA-BARNA, L.,PIGNÉ, Y.,NAVARRETE GUTIÉRREZ, T. et BENETTO, E., 2016. Framework and computational tool for the consideration of time dependency in Life Cycle Inventory: Proof of concept. In : *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 116, p. 198-206. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.12.049. Scopus

Références bibliographiques

- TRIGAUX, D., ALLACKER, K. et DE TROYER, F., 2017. Life Cycle Assessment of Land Use in Neighborhoods. In : *Procedia Environmental Sciences*. 1 janvier 2017. Vol. 38, p. 595-602. DOI 10.1016/j.proenv.2017.03.133.
- UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, et POPULATION DIVISION, 2019. *World urbanization prospects: the 2018 revision*. S.l.
- VELASCO, F. J. S., HADDOUCHE, M. R., ILLÁN-GÓMEZ, F. et GARCÍA-CASCALES, J. R., 2022. Experimental characterization of the coupling and heating performance of a CO₂ water-to-water heat pump and a water storage tank for domestic hot water production system. In : *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 265. DOI 10.1016/j.enbuild.2022.112085. Scopus
- VENTURA, A., 2022. Conceptual issue of the dynamic GWP indicator and solution. In : *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2022. DOI 10.1007/s11367-022-02028-x. Scopus
- VORGER, E., 2014. *Étude de l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments*. Thèse de doctorat. S.l. : École nationale supérieure des mines de Paris.
- WANG, M., ZHANG, J. et LIU, H., 2022. Thermodynamic analysis and optimization of two low-grade energy driven transcritical CO₂ combined cooling, heating and power systems. In : *Energy*. 2022. Vol. 249. DOI 10.1016/j.energy.2022.123765. Scopus
- WEIDEMA, B. P., 1998. New developments in the methodology for life cycle assessment. In : *International Journal of Life Cycle Assessment*. Tsukuba : s.n. 1998. p. 47-50.
- WEIDEMA, B. P., 2003. Market information in life cycle assessment. In : *Environmental project* [en ligne]. 2003. Vol. 863. [Consulté le 28 juin 2012]. Disponible à l'adresse : <http://www.norlca.org/resources/780.pdf>.
- WEIDEMA, B. P., EKVALL, T. et HEIJUNGS, R., 2009. *Guidelines for applications of deepened and broadened LCA* [en ligne]. 2009. S.l. : s.n. [Consulté le 15 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://lca-net.com/publications/show/guidelines-applications-deepened-broadened-lca/>.
- WERNET, G., BAUER, C., STEUBING, B., REINHARD, J., MORENO-RUIZ, E. et WEIDEMA, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. septembre 2016. Vol. 21, n° 9, p. 1218-1230. DOI 10.1007/s11367-016-1087-8.
- WIBERG, A. H., WIIK, M. K., AUKLEND, H., SLAKE, M. L., TUNCER, Z., MANNI, M., CECI, G. et HOFMEISTER, T., 2019. Life cycle assessment for Zero Emission Buildings - A chronology of the development of a visual, dynamic and integrated approach. In : . S.l. : s.n. 2019. Scopus
- ZHANG, S., YIN, P., WANG, J. et WANG, Y., 2022. An integrated parametric structural design tool for super high-rise buildings based on Grasshopper and intelligent algorithm. In : . S.l. : s.n. 2022. Scopus
- ZHAO, Y., LI, Y., CHEN, X., XIA, D., HUANG, Y. et LOU, S., 2022. Parametric optimization procedure for efficient window design of educational buildings in the Pearl River Delta of China. In : *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2022. Vol. 17, p. 394-410. DOI 10.1093/ijlct/ctac013. Scopus
- ZITZLER, E., 1999. *Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications*. Thèse de doctorat. S.l. : Swiss Federal Institute of Technology of Zurich (ETH).

Annexes

Annexe A - Cas d'étude du projet Pulse-Paris

Ces détails sont tirés du livrable 3 du projet Pulse-Paris (Pawlak et al., 2020).

Scénario 1

Le scénario correspond à un cas où il n'y a pas d'économie circulaire. Tous les matériaux de construction sont neufs, puis éliminés par dépôt en déchetterie pour les déchets inertes, et par incinération pour le reste. On note que les éléments en bois sont dits « certifiés », leur traçabilité est contrôlée et permet d'intégrer du carbone biogénique dans les calculs.

Scénario 2

Le scénario 2 inclut des pratiques courantes de revalorisation avec quelques spécificités du projet. Il constitue un scénario « minimum » compte tenu de l'évolution des réglementations. Il est généralement caractérisé par :

- L'usage de 40% de métaux recyclés (aluminium, acier, cuivre) en construction, puis un recyclage en fin de vie de ces éléments à hauteur de 90%.
- Des éléments minéraux du gros œuvre (béton, brique, pierre calcaire) neufs en construction, mais revalorisés à 70% en fin de vie (notamment en graviers concassés).
- Des éléments de gros-œuvre en bois (poutres, planchers) neufs en construction, puis réemployés ou réutilisés à 70% en fin de vie.
- Des panneaux en bois (OSB, liège) neufs en construction, puis recyclés à 90% en fin de vie.
- Des plaques de plâtre neuves en construction, puis recyclées à 70% en fin de vie.
- Des équipements sanitaires (baignoires, robinetteries, éviers, etc) provenant à 40% du réemploi, puis non revalorisés en fin de vie. Pour la céramique, 40% est réemployée en construction, puis 70% est mise à disposition pour le réemploi après déconstruction des bâtiments.
- Les radiateurs en fonte sont à 40% réemployés en construction, puis 70% pourront être réemployés/réutilisés en fin de vie.
- Des câbles électriques neufs, puis réemployés/réutilisés à 70% en fin de vie du bâtiment

Annexes

- Des portes extérieures isolantes neuves, puis réemployées à 70% après déconstruction. Les portes en bois intérieures sont réemployées à 70% en construction, puis 70% le seront également en fin de vie du bâtiment.
- Des panneaux solaires installés neufs, puis recyclés à 70% en fin de vie.
- Les isolants (laine de bois, laine de verre, cellulose, etc) sont neufs en construction, et remis en déchèterie ou incinérés en fin de vie.
- Les menuiseries (fenêtres double et triple vitrages) sont neuves et non revalorisées en fin de vie.
- Les éléments en PVC et polyéthylène sont neufs et incinérés en fin de vie.

Puis quelques spécificités par bâtiments :

- Chaufferie : parquet neuf, puis réemployé/réutilisé à 70% en fin de vie.
- Petit : réemploi à 80% en construction des briques de verre, puis recyclage à 70% en fin de vie. Céramique en façade neuve, mais recyclée à 70% en fin de vie. Les vitrages des murs rideaux sont neufs, puis recyclé à 70% en fin de vie.
- Oratoire et Robin : des menuiseries simple vitrage sont utilisées (doublées par des fenêtres double vitrage), dont 80% proviennent du réemploi. Elles ne seront pas revalorisées en fin de vie.

Scénario 3

Le scénario 3 reprend le scénario 2 avec une part plus importante de revalorisation en phase de construction. Il garde les mêmes hypothèses pour la fin de vie, mais pour la construction il comprend notamment :

- Incorporation de 30% de gravier recyclé pour les éléments en béton.
- Réemploi à hauteur de 30% de briques, et de 50% de pierres calcaires.
- Des éléments de gros-œuvre en bois issus du réemploi à hauteur de 30%.
- Des panneaux en bois (OSB, liège) issus du réemploi à hauteur de 70%.
- Utilisation de plaques de plâtre recyclées à hauteur de 50%.
- Incorporation de 20% de PVC recyclé
- 30% des câbles électriques issus du réemploi.

Scénario 4

Le scénario 4 reprend le scénario 3, avec des taux de recyclage et de réemploi plus forts en fin de vie :

- Recyclage à 90% du béton en graviers concassés.
- Réemploi à 90% des pierres calcaires.
- Réemploi ou recyclage (concassage) des briques à 90%.
- Réemploi à 90% des éléments en bois du gros-œuvre.
- Réemploi à 50% des équipements sanitaires
- Réemploi à 50% des menuiseries (sauf les fenêtres simples vitrages des bâtiments Oratoire et Robin).
- Recyclage à 70% de l'isolation en cellulose.
- Recyclage à 90% des plaques de plâtre.
- Recyclage à 90% du PVC.
- Recyclage à 90% des panneaux solaires.

L'ilot Chaufferie est composé de trois bâtiments séparés par des axes piétonniers. La surface de plancher totale est de 10751 m², qui compte environ 7815 m² de surface habitable (SHAB) de logements et 1414 m² de surface utile (SU) pour des locaux d'activités/ateliers.

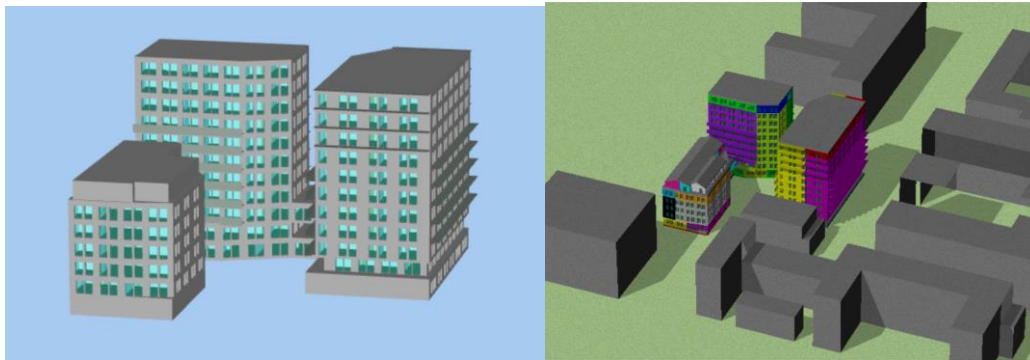


Figure A-1: Maquette numérique de l'ilot Chaufferie (avec à droite le zonage thermique et les masques proches).

Les caractéristiques principales de cet ilot sont les suivantes :

- Murs extérieurs : construction en brique (22cm) avec isolation par l'intérieur en laine de bois (30cm) et panneau de liège (1cm). $R = 7,6 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$
- Parois internes : Noyau en béton lourd, et parois légères en panneau OSB (3cm), isolation phonique en panneau de liège (1cm de chaque côté).
- Planchers intermédiaires : Faux plafond acoustique (10cm), plancher CLT bois (25cm), ravaillage béton (8cm), chape isolante (5cm), parquet bois massif (2cm). Structure complétée avec des poutres en acier.
- Plancher bas (R-1) : Béton lourd (20cm), laine de bois (20cm), ravaillage béton (8cm), chape isolante (5cm). $R = 6,5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$.
- Plancher bas (RDC) : Faux plafond acoustique (10cm), béton armé (20cm), ravaillage béton (8cm), chape isolante (5cm), parquet bois massif (2cm).
- Toiture : fibre de cellulose (10cm), dalle CLT (25cm), béton (10cm), polyuréthane (15cm), substrat végétal (30cm ou plus). $R = 9.9 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$.
- Revêtement aluminium pour le niveau R+5 du plus petit bâtiment.
- Menuiseries :
 - Fenêtres : double vitrage bois/aluminium, $U_w = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$
 - Portes : bois avec isolation pour l'extérieur ($R = 1,25 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$), bois simple pour l'intérieur.
- Etanchéité : 0,6 vol/h sous 50Pa
- Ventilation : VMC double flux avec un rendement de 85%, surventilation nocturne en été.
- Production d'énergie renouvelable : 300m² de surface de photovoltaïque en toiture.

Annexe B - Cas d'étude

La composition de l'enveloppe des bâtiments du quartier des Lumières est présentée Tableau B-1.

Tableau B-1: Composition de l'enveloppe des bâtiments du cas d'étude

Composition	Matériau	Epaisseur (cm)
Mur extérieur	Panneau de particules bois	2
	Laine de verre	15
	Béton lourd	20
	Placoplatre BA 13	1,3
Plancher bas	Polystyrène expansé	15
	Béton lourd	20
	Carrelage	1
Mur intérieur	Béton lourd	20
Plancher intermédiaire	Béton lourd	20
Toiture	Bitume pur	0,5
	Polyuréthane	15
	Béton lourd	20
	Placoplatre BA 13	1,3

Annexe C - Forfait ACV

Les quantités de matériaux utilisés dans les équipements sanitaires et électriques du bâtiment de logements L1 sont présentée dans le Tableau C-2.

Tableau C-2 : Quantité de matériaux du forfait ACV

Cuivre (kg)	Acier (kg)	PVC (kg)	Céramique (kg)	Polyéthylène (kg)	Câble 3 conducteurs (m)
2431	7326	1520	13954	3628	34885

Annexe D - Catégories d'aliments et quantités correspondantes du panier moyen considéré

Un panier alimentaire a été établi pour un français moyen. Afin de simplifier la collecte de données, la méthode utilisant une vingtaine d'aliments pour représenter les catégories correspondantes a été sélectionnée. Pour cela, le panier moyen européen a servi de base, à laquelle ont été enlevées les boissons excepté le café, car elles représentent seulement 10 % de l'impact environnemental de la consommation alimentaire en France. De plus, les catégories de pain et de pâtes ont été rassemblées avec les produits à base de céréales, car les impacts sont similaires à ceux du blé. Les catégories, les produits et les quantités correspondantes du panier moyen sont décrites dans le Tableau E-3.

Tableau E-3 : Catégories et quantités du panier moyen français considéré

Catégorie d'aliment	Produit	Quantité (kg/personne/an)
Viande	Porc	41
	Viande rouge	13,7
	Poulet	22,9
Produits laitiers	Lait	8031
	Fromage	15
	Beurre	3,6
Sucre	Sucre de betterave	23,8
	Sucre de canne	6,0
Produits à base de céréales	Blé	47,5
Légumes	Pomme de terre	69,1
Fruits	Pomme	16,1
	Orange	17,4
Huiles végétales	Huile d'olive	5,3
	Huile de tournesol	5,4
Café	Café	3,5

Annexe E - Quantités matériaux ascenseurs

Tableau D-4 : Quantités de matériaux relatives aux ascenseurs

Quantité de matériaux (kg)	Ascenseur bâtiment 10 étages	Ascenseur bâtiment 30 étages
Aluminium	129,6	851,4
Fer forgé	7618,9	50051,9
Cuivre	188	1234,9
Acier inoxydable	7,1	46,8
Acier sans revêtement	6973,8	45813,9
Acier (revêtement zinc)	4008,1	16331,1
Pastique	155,2	1019,7
Caoutchouc	4,3	28,1
Verre	199,4	1309,8
Composants électriques et électroniques	969,8	6371,1

Liste des figures

Figure 1-1 : Modèle du cycle de vie d'un bâtiment (Lamé et al., 2017).....	9
Figure 1-2 : Pertinence des propositions et incertitudes associées au cours d'un projet de conception de bâtiment (Hollberg et Ruth, 2016)	12
Figure 1-3 : Echelle de Lansik émettant un ordre de priorité entre les possibilités de gestion des déchets	15
Figure 1-4 : Cascade de cycle de vie impliquant trois cycle de vie d'un produit séparés par des procédés de recyclage (Ekvall and Tillman 1997)	22
Figure 1-5 : Proportion des technologies de production d'électricité intervenant dans le mix marginal annuel de 2013, d'après (Roux, 2016).....	25
Figure 1-6 : Illustration de la caractérisation des impacts au niveau midpoint et endpoint à partir de l'inventaire (Frossard et Peuportier, 2021).....	32
Figure 1-7 : Illustration de la domination au sens de Pareto (Recht, 2016)	37
Figure 1-8 : Principe général de fonctionnement des algorithmes génétiques	38
Figure 1-9 : Illustration des deux objectifs en optimisation multicritère : l'intensification (1) et la diversification (2) de l'exploration (cas d'un problème de minimisation à deux critères), d'après Rivallain (2013).....	40
Figure 1-10 : Illustration de l'indicateur hypervolume calculé à partir d'un jeu de trois solutions non dominées et du point de référence de coordonnées (20,20) dans le cadre de la minimisation des critères f1 et f2 (Branke et al., 2008)	40
Figure 2-1 : Organisation de la suite logiciel Pleiades, source : www.izuba.fr	53
Figure 2-2 : Schéma de fonctionnement de la Blackbox STD	56
Figure 2-3 : Fonctionnement de la Blackbox ACV	59

Liste des figures

Figure 2-4 : Fonctionnement de la simulation multiple sur Pleiades	60
Figure 2-5 : Profil de performance de l'îlot en fonction des différents scénarios (Pawlak et al., 2020) 63	
Figure 2-6 : Impact de l'étape de construction des bâtiments, par lot, sur le changement climatique (Pawlak et al., 2020).....	67
Figure 2-7 : Epaisseur équivalente de béton dans les fondations en fonction du nombre d'étages	70
Figure 2-8 : Plan d'un niveau de la tour EDF de la défense	71
Figure 2-9 : Modélisation simplifiée de la production nationale d'électricité (Roux, 2016).....	73
Figure 2-10 : Répartition des technologies de production d'électricité au cours de l'année 2016.....	74
Figure 2-11 : Ordre de sollicitation des technologies de production.....	74
Figure 2-12 : Répartition des technologies de production d'électricité marginale en 2016.....	75
Figure 2-13 : Etiquettes environnementales de l'indicateur du changement climatique des maisons individuelles, des logements collectifs et des bureaux en kg CO ₂ eq./m ² /an	78
Figure 2-14 : Localisation des grands projets, source : UFV (2016)	79
Figure 2-15 : Projection du quartier des Lumières et de la future gare du Grand Paris Express, Credits : Sogelym - Dixence	80
Figure 2-16 : Modélisation 3D du quartier des Lumières sur Pléiades	81
Figure 2-17 : Représentation 3D du bâtiment de logements (à gauche) et du bâtiment de bureaux (à droite)	82
Figure 2-18 : Temps de calcul et taux de précision en fonction du nombre de zones thermiques	84
Figure 2-19 : Représentation 3D de la variante de référence comprenant 12 zones thermiques avec zonage apparent.....	86
Figure 2-20 : Temps de simulation et précision des résultats thermiques du bâtiment L1 en fonction du nombre de zones thermiques	86
Figure 2-21 : Précision du niveau d'inconfort en fonction du nombre de zones thermiques	87
Figure 2-22 : Représentation 3D du bâtiment de bureaux - Zonage optimal	88
Figure 2-23 : Résultats issus de la simulation thermique des bâtiments de logements collectifs.....	93
Figure 2-24 : Résultats issus de la simulation thermique des bâtiments de bureaux.....	94
Figure 2-25 : Impacts environnementaux des bâtiments de logements.....	96
Figure 2-26 : Provenance des impacts lors de la production d'un TJ de chaleur par le RCU.....	97

Figure 2-27 : Impacts environnementaux des bâtiments de bureaux	98
Figure 2-28 : Contribution des étapes du cycle de vie aux impacts environnementaux du bâtiment L1	98
Figure 2-29 : Contribution des types d'usage aux impacts environnementaux	100
Figure 2-30 : Analyse de contribution des composants du bâtiment.....	100
Figure 2-31 : Analyse de contribution des étapes du cycle de vie du bâtiment R2	102
Figure 2-32 : Part de l'étape d'utilisation par rapport à l'ensemble du cycle de vie.....	103
Figure 2-33 : Contribution des fondations et de l'acier de la superstructure à l'ensemble des impacts des composants du bâtiment (en %)	104
Figure 3-1 : Mise en évidence de la boucle générationnelle au cours de la procédure de simulations multiples.....	111
Figure 3-2 : Calcul de la distance de crowding (Deb, 2011).....	111
Figure 3-3 : Fonctionnement de l'algorithme évolutionnaire NSGA-II	115
Figure 3-4 : Combinaison des solutions non dominées résultant de deux optimisations de bâtiments.....	117
Figure 3-5 : Évolution du front de Pareto de l'optimisation du bâtiment de logements au cours des générations	122
Figure 3-6 : Évolution du front de Pareto de l'optimisation du bâtiment de bureaux au cours des générations	123
Figure 3-7 : Évolution du front de Pareto de l'optimisation multibâtiment au cours des générations.	123
Figure 3-8 : Évolution de l'hypervolume normalisé au cours des 20 générations.....	124
Figure 3-9 : Évolution de l'hypervolume de trois optimisations distinctes au cours des 20 générations	125
Figure 3-10 : Évolution de l'hypervolume des sept optimisations réalisées avec la même population initiale.....	127
Figure 3-11 : Comparaison des résultats des optimisations multibâtiment et monobâtiment	128
Figure 3-12 : Comparaison des solutions non dominées des deux méthodes d'optimisation.....	129
Figure 3-13 : Évolution de l'hypervolume en fonction du taux de croisement au cours des générations	130
Figure 3-14 : Évolution de l'hypervolume en fonction du taux de mutation au cours des générations.....	131
Figure 3-15 : Solutions de l'optimisation du bâtiment L1	136

Liste des figures

Figure 3-16 : Besoins de chauffage du bâtiment L1 correspondant aux solutions du front de Pareto	136
Figure 3-17 : Front de Pareto optimal du bâtiment L1	137
Figure 3-18 : Évolution des fronts de Pareto au cours des générations.....	138
Figure 3-19 : Point de référence défini à partir des coordonnées maximales des solutions évaluées .	139
Figure 3-20 : Évolution de l'hypervolume au cours des générations.....	140
Figure 3-21 : Ordre des choix les plus efficaces à mettre en œuvre pour tendre vers une réduction des émissions de GES.....	141
Figure 3-22 : Front de Pareto résultant de la minimisation des dommages à la santé et du coût d'investissement du bâtiment L1	143
Figure 3-23 : Front de Pareto résultant de la minimisation des dommages à la biodiversité et du coût d'investissement du bâtiment L1	143
Figure 3-24 : Ordre des choix les plus efficaces pour réduire les dommages à la santé humaine	145
Figure 3-25 : Front de Pareto final de l'optimisation visant à minimiser la consommation d'énergie primaire et le coût d'investissement du bâtiment L1	146
Figure 3-26 : Front de Pareto final résultant de la minimisation des déchets produits au cours du cycle de vie du bâtiment L1 et de son coût d'investissement	147
Figure 3-27 : Pourcentage d'ouvertures à mettre en œuvre pour réduire la quantité de déchets produits	148
Figure 3-28 : Front de Pareto final de l'optimisation environnementale multicritère sous contrainte	151
Figure 3-29 : Épaisseur de laine de verre dans les façades des solutions résultant de la minimisation des émissions de gaz à effet de serre et du coût d'investissement avec et sans contrainte	152
Figure 4-1 : Quantité de béton (fondations + superstructure) en fonction du nombre d'étage	162
Figure 4-2 : Quantité d'acier (fondations + superstructure) en fonction du nombre d'étages	162
Figure 4-3 : Quantité de béton au sein des fondations des structures bois en fonction du nombre d'étages	163
Figure 4-4 : Quantité de bois de bois dans les éléments verticaux de la superstructure en fonction du nombre d'étages	163
Figure 4-5 : Représentation 3D de la maison modélisée sur Rhinoceros 3D	166
Figure 4-6 : Schéma d'algorithmes graphiques pour l'export d'un modèle Rhino en format gbXML	166
Figure 4-7 : Représentation 3D de la maison individuelle importée dans Pleiades BIM.....	168

Figure 4-8 : Génération d'un bâtiment standard à partir de Grasshopper	170
Figure 4-9 : Barre de logement (à gauche) et tour (à droite) générées à partir de Grasshopper.....	171
Figure 4-10 : Plan de la version haute du quartier, tours de bureaux (à gauche), tours de logements (au milieu), plan initial (à droite)	174
Figure 4-11 : Représentation 3D des bureaux (à gauche) et des logements (à droite) de la version haute du quartier	174
Figure 4-12 : Bâtiments de bureaux (à gauche) et de logements (au milieu) de la version basse du quartier, et plan initial (à droite).....	175
Figure 4-13 : Représentation 3D des bureaux (à gauche) et des logements (à droite) de la version basse du quartier	175
Figure 4-14 : Besoins moyens de chauffage et de climatisation des deux versions du quartier.....	176
Figure 4-15 : Comparaison des impacts environnementaux des bâtiments des deux versions du quartier	177
Figure 4-16 : Répartition des postes d'émissions de GES dans les logements et bureaux dans les deux propositions de plan d'aménagement urbain.....	178
Figure 4-17 : Quantités relatives de béton et d'acier des éléments structurels (d'après Mendes, 2022)	179
Figure 4-18 : Représentation 3D de la tour de bureaux depuis Rhino (à gauche) et Pleiades (à droite)	180
Figure 4-19 : Représentation 3D des petits bâtiments de bureaux depuis Rhino (à gauche) et Pleiades (à droite)	180
Figure 4-20 : Comparaison environnementale des deux variantes sur l'étape de construction.....	181
Figure 4-21 : Comparaison environnementale globale des deux variantes de bâtiments.....	182
Figure 4-22 : Répartition des étapes responsables de la production de déchets.....	183
Figure 5-1 : Front de Pareto de la variante PAC du bâtiment L1	192
Figure 5-2 : Besoins de chauffage des individus appartenant au front de Pareto final	193
Figure 5-3 : Contribution des étapes du cycle de vie et des postes de consommation aux émissions de GES	193
Figure 5-4 : Comparaison des fronts de Pareto des variantes PAC et RCU du bâtiment L1	195
Figure 5-5 : Emissions de GES du front de Pareto, sur l'étape de construction du bâtiment (variante PAC).....	196

Liste des figures

Figure 5-6 : Pourcentage de diminution de l'hypervolume entre deux générations successives	197
Figure 5-7 : Front de Pareto de l'optimisation intégrant un RCU dynamique	198
Figure 5-8 : Fronts de Pareto de la vingtième et cinquantième génération	199
Figure 5-9 : Fronts de Pareto de l'optimisation du bâtiment de logements L1 obtenus avec différents systèmes de production de chaleur.....	200
Figure 5-10 : Répartition des émissions de CO ₂ eq. du bâtiment de logements selon le mix électrique et le système de chauffage (PAC, RCU et EJ –effet Joule)	202
Figure 5-11 : Répartition des émissions de CO ₂ eq. du bâtiment de bureaux suivant le mix électrique et le système de chauffage (PAC, RCU et EJ –effet Joule)	203
Figure 5-12 : Front de Pareto de l'optimisation du bâtiment L1, comprenant une pompe à chaleur et un mix dynamique conséquentiel prospectif	204
Figure 5-13 : Fronts de Pareto finaux des optimisations du bâtiment de logements L1 selon l'approche d'ACV et le modèle du RCU sélectionnés.	205
Figure 5-14 : Front de Pareto de l'optimisation du bâtiment de logements L2.....	207
Figure 5-15 : Besoins de chauffage en fonction du coût d'investissement	208
Figure 5-16 : Ordre des choix les plus efficaces à mettre en œuvre pour réduire les émissions de GES	208
Figure 5-17 : Émissions de GES des solutions des fronts de Pareto en fonction du coût d'investissement pour les 3 bâtiments.....	209
Figure 5-18 : Besoins de chauffage des solutions des fronts de Pareto en fonction du coût d'investissement.....	210
Figure 5-19 : Front de Pareto résultant de la combinaison des solutions non dominées des bâtiments L2 et L3.....	211
Figure 5-20 : Front de Pareto résultant de l'optimisation des trois bâtiments L2, L3 et L5.....	212
Figure 5-21 : Fronts de Pareto des bâtiments L2, L3 et L5 et de la combinaison des trois optimisations	212
Figure 5-22 : Répartition de l'épaisseur de l'isolant au sein des murs extérieurs des solutions du front de Pareto du bâtiment L1	214
Figure 5-23 : Répartition de l'épaisseur d'isolant au sein des murs extérieurs du jeu de solutions non dominées de l'optimisation du bâtiment R2.....	214
Figure 5-24 : Répartition des paramètres des fenêtres au sein des solutions des fronts de Pareto	215

Figure 5-25 : Fronts de Pareto des optimisations des bâtiments L1 et R2	216
Figure 5-26 : Emissions de GES provenant du traitement des déchets ménagers en fonction du taux de recyclage du papier et du verre.....	218
Figure 5-27 : Répartition de l'usage des transports par les habitants et les employés	220
Figure 5-28 : Émissions de GES engendrées par la mobilité quotidienne	221
Figure 5-29 : Comparaison environnementale des deux variantes de bâtiments avec une installation PV en toiture.....	224
Figure 5-30 : Emissions de GES liées aux matériaux et à la consommation électrique des ascenseurs	226
Figure A-1: Maquette numérique de l'îlot Chaufferie (avec à droite le zonage thermique et les masques proches).	247

Liste des tableaux

Tableau 2-1: Exemple de génération des fichiers tirage STD et ACV.....	58
Tableau 2-2: Catégories d'impact considérées au niveau endpoint dans Impact World+ et ReCiPe	64
Tableau 2-3: Méthodes de caractérisation des indicateurs environnementaux sélectionnés.....	65
Tableau 2-4 : Caractéristiques des bâtiments choisis pour établir les références environnementales...	76
Tableau 2-5 : Description des variantes de maisons individuelles pour la création des étiquettes environnementales.....	77
Tableau 2-6 : Caractéristiques des bâtiments de bureaux de de logements.....	82
Tableau 2-7 : Répartition des 8 zones du bâtiment de bureaux.....	88
Tableau 3-1 : Composition de l'enveloppe des bâtiments du cas de base	119
Tableau 3-2 : Épaisseurs d'isolants et types de fenêtres de l'espace de recherche	120
Tableau 3-3 : Caractéristiques thermiques et économiques des fenêtres	120
Tableau 3-4 : Caractéristiques des variantes contribuant au point de référence de l'hypervolume	139
Tableau 4-1 : Description des composants utilisés dans le fichier Grasshopper.....	167
Tableau 4-2 : Résultats de l'étude thermique de la maison individuelle provenant de l'export de Rhinoceros 3D.....	168
Tableau 4-3 : Répartition des technologies au sein du mix électrique	169
Tableau 4-4 : Impacts environnementaux de la maison individuelle (Impact/m ² /an)	169
Tableau 4-5 : Caractéristiques des deux propositions d'aménagement du quartier des Lumières	173
Tableau 4-6 : Caractéristiques de conception des variantes de bâtiments.....	179
Tableau 5-1 : Description des gènes de l'optimisation multicritère.....	191

Liste des tableaux

Tableau 5-2 : Description de l'espace de recherche	206
Tableau 5-3 : Caractéristiques des bâtiments L2 et L3	206
Tableau 5-4 : Émissions de GES relatives à la culture des fraises et des tomates	222
Tableau B-1: Composition de l'enveloppe des bâtiments du cas d'étude	248
Tableau C-2 : Quantité de matériaux du forfait ACV	249
Tableau D-3 : Quantités de matériaux relatives aux ascenseurs	251
Tableau E-4 : Catégories et quantités du panier moyen français considéré	250

RÉSUMÉ

Cette thèse a pour objet d'étudier une procédure d'optimisation environnementale multicritère à l'échelle d'îlot urbain en vue d'élaborer une démarche d'aide à la décision pour l'écoconception des quartiers.

Une méthode d'optimisation multicritère multibâtiment est tout d'abord développée afin de proposer les meilleurs compromis entre les impacts environnementaux et le coût d'investissement engendré par différents bâtiments d'un quartier.

Ensuite, un couplage entre un outil de modélisation 3D utilisé dans le domaine de l'architecture et un outil fiable de simulation énergétique et environnementale des bâtiments est élaboré afin d'intégrer l'ACV en phase amont des projets, permettant d'optimiser la forme des bâtiments.

Enfin, l'extension des frontières du système à l'échelle d'un quartier constitue un développement utile pour l'aide à la décision, d'autres sources d'impact sont alors intégrées à l'évaluation environnementale.

MOTS CLÉS

Analyse de cycle de vie, Optimisation multicritère, Bâtiment, Quartier, Écoconception, Aide à la décision, Conception paramétrique

ABSTRACT

This thesis focuses on the development of a multi-criteria environmental optimisation procedure at an urban block scale in order to elaborate a decision support approach for the eco-design of districts.

A multi-building multi-criteria optimisation method is first developed in order to propose the best compromises between environmental impacts and the investment cost generated by different buildings in the neighbourhood.

Then, a coupling between a 3D modelling tool used in the field of architecture and a reliable tool for energy and environmental simulation of buildings is developed in order to integrate LCA in the upstream phase of projects, allowing the optimisation of the shape of the buildings.

Finally, the extension of the system's boundaries to the neighbourhood scale is useful for decision support; other sources of impact are then integrated into the environmental assessment.

KEYWORDS

Life cycle assessment, Multicriteria optimisation, Building, Neighbourhood, Ecodesign, Decision making, Parametric design