Optimisation robuste multicritère pour l'écoconception de bâtiments zéro-énergie

Mija Frossard

▶ **To cite this version:**

Mija Frossard. Optimisation robuste multicritère pour l'écoconception de bâtiments zéro-énergie. Energie électrique. Université Paris sciences et lettres, 2020. Français. NNT : 2020UPSLM041 . tel-03122524

HAL Id: tel-03122524
https://pastel.hal.science/tel-03122524

Submitted on 27 Jan 2021

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

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

PSL
UNIVERSITÉ PARIS

THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PSL
Préparée à MINES ParisTech

Optimisation robuste multicritère pour l'écoconception de bâtiments zéro-énergie

Soutenue par

Mija FROSSARD

Le 17 septembre 2020

École doctorale n° 621

Ingénierie des Systèmes, Matériaux, Mécanique, Énergie – ISMME

Spécialité

Énergétique et Génie des Procédés

Composition du jury :

Cécile BULLE Professeure, CIRAIG, UQÀM	*Présidente*
Étienne WURTZ, HDR Directeur de recherche, CNRS, CEA-INES	*Rapporteur*
Évelyne LUTTON, Directeur de recherche, INRA, AgroParisTech	*Examinatrice*
Adélaïde FERAILLE Maître de Conférences, École des Ponts ParisTech	*Examinatrice*
Maxime TROCMÉ Directeur déploiement R&D, VINCI	*Examinateur*
Patrick, SCHALBART Responsable scientifique, ARMINES	*Examinateur*
Bruno PEUPORTIER Directeur de recherche, MINES ParisTech	*Directeur de thèse*

MINES ParisTech | PSL

” Pour ce qui est de l’avenir, il ne s’agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible. “

– Antoine de Saint Exupéry, *Citadelle,* 1948

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Bruno Peuportier et Patrick Schalbart pour la confiance qu'ils m'ont témoignée depuis mon stage de fin de d'étude à ma thèse de doctorat. L'accompagnement, l'écoute et l'excellence scientifique qu'ils m'ont apportés ces dernières années m'ont permis de progresser dans les vastes domaines de l'énergétique des bâtiments et de l'ACV.

Un hommage doit être rendu aux « anciens » d'ETB qui m'ont accompagné humainement lorsque nos chemins se sont croisés et aussi intellectuellement lorsque je me suis appuyé sur leurs travaux de thèse respectifs. Merci à Guillaume, Thomas, Charlotte, Marie-Lise, Marie, Simon et Maxime. L'écosystème ETB c'est aussi Izuba et Kocliko que j'ai eu le plaisir de revoir au moins une fois chaque année lors de nos sommets tripartites. Merci à Stéphane, Renaud, Ludovic et Jean-Louis côté Izuba, et merci à Eric, Renaud et Fabio côté Kocliko.

Dédicace à l'équipe ETB actuelle et aux nouveaux : Long, Aurore, Lucas, Samih, Charbel, Fatima et Rachna ! Courage à vous dans vos thèses respectives et si je peux me permettre un conseil, rédigez régulièrement, je crois que ça aide ☺. Bien sûr dédicace spéciale à Michael le bg qui a été présent de ma soutenance de stage de M2 à ma soutenance de thèse ! En dehors de l'équipe ETB, beaucoup de supers moments ont été partagés avec d'autres personnes du centre qui sont devenus des amis aujourd'hui : Afif (le papa le plus cool de France), Egoï (un rude concurrent à ce titre), Mathildi, Florian, Thibaut, Quentin et Rupu.

Je remercie le jury de thèse et plus particulièrement les rapporteurs Cécile Bulle et Etienne Wurtz qui se sont plongés dans ce manuscrit conséquent pour me partager leurs retours éclairés. Merci aux examinateurs Evelyne Lutton, Adélaïde Feraille et Maxime Trocmé. Merci également aux personnes qui m'ont offert l'opportunité de donner des enseignements : Martin Hendel, Paula Perez-Lopez, Philippe Rivière et Jean-Marc Nogier.

Merci à Tim et Kévin mes colocs qui m'ont soutenus et ont été témoins de cette période très particulière de finalisation du manuscrit en plein confinement.

Enfin, je remercie mes sœurs et mes parents pour leur soutien et pour tout le reste.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements……i

Table des matières……..iii

Nomenclature……...viii

Introduction……..1

1 Problématique et état de l'art……....7

1.1 La conception et l'écoconception des bâtiments……...8

1.1.1 Résumé historique……..8

1.1.2 Les étapes de la phase de conception……...10

1.1.3 Quelle place pour l'écoconception en phase de conception ? ……12

1.2 Le bâtiment zéro-énergie……14

1.2.1 Le bâtiment zéro-énergie d'après la réglementation européenne……14

1.2.2 Cadre de définition du bâtiment zéro-énergie dans la littérature……..16

1.2.3 Le bâtiment zéro-énergie dans la réglementation française……26

1.3 L'analyse de cycle de vie……30

1.3.1 Les étapes de l'ACV……31

1.3.2 Méthodes en ACV de bâtiment……40

1.3.3 Intégration de l'ACV de bâtiment en phase de conception……..52

1.4 L'optimisation multicritère de bâtiment……..57

1.4.1 Notions en optimisation multicritère……57

1.4.2 Application de l'optimisation multicritère au bâtiment……68

1.5 Incertitudes et écoconception robuste……..80

1.5.1 Incertitudes et prospective en ACV……..81

1.5.2 Incertitudes en écoconception de bâtiment……...90

1.5.3 Méthodes d'aide à la décision et de conception robuste……...99

1.5.4 Applications des méthodes aux bâtiments…….107

Conclusion du chapitre 1…….112

2 Développements en ACV et en optimisation multicritère……114

2.1 Principaux outils utilisés……115

2.1.1 Simulation énergétique dynamique avec Pleiades+Comfie……...115

2.1.2 Analyse de cycle de vie avec Pleiades ACV EQUER……117

2.1.3 Modèle de système électrique dynamique……..121

2.1.4 Algorithme d'optimisation NSGA-II……..125

2.2 Améliorations apportées à la fiabilité des outils……132

2.2.1 Mise à jour des méthodes de caractérisation……..133

2.2.2 Mise à jour des données d'inventaire…….144

2.2.3 Échantillonnage de la population initiale……...161

2.3 Cas d'étude……163

2.3.1 Contexte……..163

2.3.2 Présentation du cas d'étude……163

2.3.3 Modélisation en SED et en ACV……169

Conclusion du chapitre 2…….182

3 Optimisation multicritère de bâtiment zéro-énergie…….184

3.1 Problème d'optimisation multicritère initial…….185

3.1.1 Présentation du problème……...185

3.1.2 Données économiques……190

3.1.3 Analyse des résultats……..193

3.2 Influence de l'espace de décision……..199

3.2.1 Présentation du problème……...199

3.2.2 Espace de décision……..200

3.2.3 Comparaison des variantes constructives……...204

3.2.4 Adaptation de l'algorithme d'optimisation……207

3.2.5 Analyse des résultats……..210

3.2.6 Choix d'une solution optimale……...222

3.3 Influence de la contrainte zéro-énergie primaire……...233

3.3.1 Présentation du problème……...233

3.3.2 Coefficient d'énergie primaire du mix électrique……..233

3.3.3 Analyse des résultats……..238

Conclusion du chapitre 3……241

4 Méthode prospective d'ACV dynamique du bâtiment……244

4.1 Fondements de la méthode……245

4.1.1 Contexte de l'écoconception robuste……245

4.1.2 Grandeurs d'intérêt robustes……..248

4.1.3 Paramètres incertains sélectionnés……249

4.1.4 Approche proposée……251

4.2 Évolution du climat……...253

4.2.1 Données climatiques en SED de bâtiment……253

4.2.2 Données climatiques futures……..255

4.2.3 Méthode de morphing……258

4.2.4 Implémentation……..259

4.2.5 Résultats……264

4.2.6 Limites……275

4.3 Évolution du système électrique……276

4.3.1 Méthode de développement……276

4.3.2 Hypothèses sur l'import et les systèmes solaires PV……..279

4.3.3 Résultats…….285

4.3.4 Limites……...295

4.4 Scénarios de cycle de vie du bâtiment……...297

4.4.1 Scénarios de cycle de vie du bâtiment……297

4.4.2 Implémentation pour l'optimisation multicritère robuste……...300

Conclusion du chapitre 4…….301

5 Optimisation multicritère robuste de bâtiment zéro-énergie……303

5.1 Robustesse du bilan zéro-énergie……..304

5.1.1 Problèmes d'optimisation robuste……..304

5.1.2 Résultats…….305

5.1.3 Analyse de scénarios……..309

5.1.4 Discussions…….311

5.2 Robustesse de l'émission de GES……..312

5.2.1 Définition du POMR……...312

5.2.2 Analyse du front à trois dimensions dans l'espace des objectifs……....314

5.2.3 Sélection d'une solution robuste…….319

Conclusion du chapitre 5…….331

Conclusion et perspectives……..333

Bibliographie……...342

Annexes……...371

Table des figures…….400

Table des tableaux……...410

NOMENCLATURE

Lettres latines

A : Indice de flexibilité des interactions avec le réseau

$c_i(t)$: Consommation du vecteur énergétique *i* au temps *t*

$d_i(t)$: Énergie importée du vecteur énergétique *i* au temps *t*

$e_i(t)$: Énergie exportée du vecteur énergétique *i* au temps *t*

$E_i(t)$: Le bilan d'énergie net exporté sur le réseau du vecteur énergétique *i* au temps *t*

$\mathrm{E}(\mathrm{GES}_{\mathrm{tot}}^{\mathrm{prosp}}(x))$: moyenne des émissions de GES prospectives totales

ET : Écart-type

$f_{conso,i}$: Taux de couverture énergétique

f_m : Fonction objectif m à optimiser

$f_{réseau,i}$: Indice d'interaction avec le réseau

g_j : Contrainte d'inégalité j à respecter

HR_j : Humidité relative en %

HS_j : Humidité spécifique en g/kg

$HR_{j,h}^{morph}$: Humidité relative du jour j de l'année et de l'heure h de la journée transformée, issue de la méthode de *morphing*

h_k : Contrainte d'égalité k à respecter

J : Nombre de contraintes d'inégalité à respecter

K : Nombre de contraintes d'égalité à respecter

L : Consommation d'énergie du bâtiment

M : Nombre de fonctions objectif

N : Nombre de données sur une année

$p_i(t)$ *:* Production du vecteur énergétique *i* au temps *t*

PP_d : Taux d'export maximal

PP_e : Taux d'export minimal

$p_{sat}(t)$: Pression de vapeur saturante en Pa

$\boldsymbol{\mathcal{R}^n}$ **:** Espace des variables de décision composé de *n* variables de décision

T_j^{moy} : Température journalière moyenne future

$T_j^{\max}$: Température journalière maximale future

T_j^{min} : Température journalière minimale future

$T_{j,h}^{morph}$: Température du jour j de l'année et de l'heure h de la journée transformée, issue de la méthode de *morphing*

U : Coefficient d'échange

$\boldsymbol{x}$: Solution de l'espace de décision $\boldsymbol{\mathcal{R}^n}$

x : Variable climatique transformée (méthode de *morphing*)

x_0 : Variable climatique dans la période actuelle (méthode de *morphing*)

$\langle x_0 \rangle_m$: Moyenne mensuelle de la variable climatique dans la période actuelle

$\overline{x_j}$: Moyenne glissante de la variable climatique au jour j

Z *:* Espace des objectifs

Abréviations et acronymes

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

ACV : Analyse de cycle de vie

ALADIN : modèle climatique régionalisé

Association négaWatt : association pour la transition énergétique

B-EPS : Variante structurelle en béton à isolation en polystyrène expansé

B-FDB : Variante structurelle en béton à isolation en fibre de bois

B-LDV : Variante structurelle en béton à isolation en laine de verre

B-LDR : Variante structurelle en béton à isolation en laine de roche

BE : *Best Estimate* – Meilleure estimation, scénario prospectif de l'ENTSO-E

BEPOS : Bâtiment à énergie positive

BZE : Bâtiment zéro-énergie

CED : *Cumulative Energy Demand* – Demande cumulative d'énergie

CMIP5 : *Coupled Model Intercomparison Project* – Projet d'intercomparaison des modèles couplés

CO_2 : Dioxyde de carbone

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

COP : Coefficient de performance

CVC : Chauffage, ventilation, climatisation

DALY : Disability Adjusted Life Years – Années de vie perdues

DG : *Distributed Generation* – Génération distribuée, scénario prospectif de l'ENTSO-E

DRIAS : Donner accès aux scénarios *climatiques* Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement

DV : Double vitrage

ECS : Eau chaude sanitaire

E_f : Énergie finale

E_p : Énergie primaire

ENTSO-E : Réseau européen des gestionnaires de réseau de transport d'électricité

EPS : Polystyrène expansé

EQUER : Évaluation de la qualité environnementale des bâtiments

FDB : Fibre de bois

GCA : *Global Climate Action* – Action Climatique globale, scénario prospectif de l'ENTSO-E

GCM : *General Circulation Model* – Modèle de circulation générale du climat

GES : Gaz à effet de serre

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

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

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

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

IAM : *Integrated Assessment Model* – Modèle intégré énergie-climat

ICV : Inventaire de cycle de vie

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

IPSL-CNRS : Institut Pierre Simon Laplace, laboratoire de recherche en climatologie

LDR : Laine de roche

LDV : Laine de verre

M&V : Mesure et vérification

MERRA 2 : modèle de réanalyse climatique de la NASA

MORPHING : méthode de transformation de données météorologiques horaires

NASA Power : service web de la NASA fournissant des données climatiques

nZEB : *nearly zero-energy building* – bâtiment quasi zéro-énergie

NZEB : *Net zero-energy building* – bâtiment zéro-énergie connecté au réseau

OB-P : Variante structurelle en ossature bois à isolation en paille

PAC : Pompe à chaleur

PDF : *Potentially Disappeared Fraction*

Poly-Si : Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin

POM : Problème d'optimisation multicritère

POMR : Problème d'optimisation multicritère robuste

PPE : Plan Pluriannuel de l'Énergie

PV : Photovoltaïque

PVC : Polychlorure de vinyle

RCM : *Regionalised Climate Model* – Modèle climatique régionalisé

RCP : *Representative Concentration Pathways* – Profil représentatifs d'évolution de concentration

RE 2020 : Réglementation environnementale 2020

RT 2012 : Réglementation thermique 2012

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

SED : Simulation énergétique dynamique

ST *: Sustainable Transition* – Transition soutenable, scénario prospectif de l'ENTSO-E

STEP : Station de Transfert d'Énergie par Pompage

TMY : *Typical Meteorological Year* – Année météorologique typique

TP : Terre-plein

TRY : *Test Reference Year* – Année météorologique de référence

TV : Triple vitrage

TYNDP : *Ten-Year Network Development Plan* – Plan de développement à 10 ans du réseau de transport d'électricité par l'ENTSO-E

UF : Unité fonctionnelle

VS : Vide-sanitaire

WRF : Weather Research and Forecasting – Modèle météorologique

XPS : Polystyrène extrudé

Lettres grecques

α_m : Changement relatif de la moyenne mensuelle d'une variable climatique dans la méthode de *morphing*

α_j : Ratio empirique des températures pour le jour j dans la méthode de *morphing*

Δx_m : Changement absolu de la moyenne mensuelle pour le mois m

T_j^{moy} : Température journalière moyenne future

$\sigma(\mathrm{GES}_{\mathrm{tot}}^{\mathrm{prosp}}(x))$: écart-type des émissions de GES prospectives sur l'étape d'utilisation

INTRODUCTION

Problématiques environnementales

Le monde fait face à de nombreuses problématiques environnementales causées principalement par des activités humaines et économiques toujours croissantes depuis l'ère industrielle. Ces activités exercent une pression sur l'environnement par l'exploitation intensive de ses ressources minières, forestières, terrestres, et des énergies fossiles. Les déséquilibres environnementaux sont tels que la Terre serait rentrée dans l'ère géologique de l'anthropocène dès la première révolution industrielle (Crutzen, 2002). Le terme de « capitalocène » est également évoqué pour écarter l'idée que la cause de ces dérèglements serait une « nature humaine » indifférenciée et pour recentrer cette notion sur les questions de productivisme et de modes de vies non soutenables (Bonneuil, 2017). Aujourd'hui, plus qu'une crise environnementale, il s'agit d'un basculement à l'échelle globale vers de nouvelles conditions de vie pour toutes les espèces sur Terre.

En 2017, la consommation mondiale d'énergie primaire reposait à 81,3 % sur les énergies fossiles dont la combustion a été responsable de l'émission de 32,84 Gt de CO_2 équivalents (IEA, 2019). Dans son rapport spécial sur le réchauffement global à 1,5°C, le GIEC estime que les émissions de GES anthropogéniques ont causé jusqu'à présent un réchauffement global moyen de 1,0°C par rapport à l'ère pré-industrielle (1790-1850) et qu'un réchauffement à 1,5°C pourrait être atteint entre 2030 et 2052 en suivant le rythme

actuel des émissions anthropogéniques (Masson-Delmotte et al., 2018). Goodwin et al. (2018) estiment, à partir de simulations numériques, qu'un budget de 150 à 330 Gt de CO_2 équivalent peut être encore émis au total jusqu'à 2080 pour conserver un réchauffement global en dessous de 2°C. Au-delà des émissions anthropogéniques, il existe un risque que le changement climatique engendre des mécanismes naturels qui activent une boucle de rétroaction positive dans le réchauffement climatique. Ces mécanismes concernent, entre autres, la réduction des capacités naturelles d'absorption du carbone des sols et des océans, la réduction de la réflexion terrestre des rayonnements solaires avec la fonte des banquises et des manteaux neigeux, ou encore l'émission naturelle de GES à cause du dégel du pergélisol et de la hausse des activités microbiennes. Steffen et al. (2018) estiment qu'un réchauffement de 2°C par rapport à l'ère pré-industrielle serait déjà susceptible de déclencher plusieurs phénomènes naturels qui participeraient à cette boucle. Certains de ces mécanismes ne sont par ailleurs pas pris en compte dans les modèles climatiques utilisés pour générer des scénarios de réchauffement possibles comme ceux proposés par le GIEC. C'est par exemple le cas de l'activité microbienne engendrée par la fonte du pergélisol qui pourrait représenter l'émission de 11 à 143 Gt de CO_2 équivalent d'ici à 2100 (Beer et al., 2020). Les conséquences climatiques concernent des épisodes de canicules, de sécheresses, de fortes précipitations et d'événements extrêmes (inondations, ouragans) plus fréquents et plus intenses selon les régions du globe. Les conséquences seront sanitaires mais aussi sociétales et politiques avec des déplacements massifs de populations dépendantes d'une activité agricole locale ou touchées par la hausse des océans. Le réchauffement global touche également les écosystèmes marins et terrestres avec la réduction des zones habitables et la disparition de certaines espèces (Masson-Delmotte et al., 2018). Enfin, des conséquences en chaînes plus complexes peuvent apparaître, comme l'acidification des océans par l'absorption du carbone atmosphérique qui entraîne la disparition de récifs coralliens qui sont les hôtes d'autres espèces marines et qui offrent une protection des côtes aux populations locales.

Le réchauffement climatique et la destruction de la biodiversité et des services écosystémiques sont des facteurs environnementaux profondément corrélés. L'IPBES (la Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques), dans son dernier rapport, estime que 1 million d'espèces animales et végétales sont aujourd'hui

menacées d'extinction, soit 25 % des espèces étudiées dans leurs travaux (IPBES, 2019). Dans les écosystèmes terrestres et d'eaux douces, le facteur direct le plus influent sur ces menaces d'extinction est le changement d'utilisation des terres, suivi par l'exploitation des ressources naturelles (minérales, forestières, animales, végétales, marines). La disparition d'espèces est non seulement une perte pour la biodiversité, mais elle engendre également des déséquilibres profonds des écosystèmes, dégradant ainsi des services écosystémiques qui sont directement profitables à l'existence humaine. Parmi ces services on peut citer la pollinisation par les insectes, l'amélioration de la qualité de l'air et de l'eau, la fertilité des sols, la régulation du climat par les végétaux et les zones humides, ou la séquestration du carbone par les sols et les océans. Une réduction drastique des émissions de GES anthropogéniques est donc aujourd'hui urgente, et doit être menée conjointement avec la protection de la nature et de la biodiversité pour garantir un avenir non seulement soutenable mais aussi souhaitable.

Le secteur du bâtiment

Le bâtiment est un secteur qui est particulièrement impactant sur l'environnement. Son utilisation représente 40 % de la consommation d'énergie et des émissions de GES dans l'Union Européenne (UE) (Lewis et al., 2013). La construction compte pour 50% des matériaux extraits en UE et elle participe de 30 à 60% des déchets produits avec la démolition (Attia, 2018 ; European Commission, 2016 ; Osmani, 2011). Afin d'encourager les économies d'énergie dans ce secteur, l'UE a mis en place en 2010 la Directive sur la performance énergétique des bâtiments (European Parliament et Council of the European Union, 2010) qui définit et impose aux Pays membres la construction neuve de bâtiments « quasi zéro-énergie » (ou « *nearly zero energy buildings* » en anglais) à partir de 2021. En France, cette typologie énergétique de bâtiment correspond au bâtiment à énergie positive (BEPOS) dont les modalités d'intégration dans la future réglementation environnementale du bâtiment, la RE2020, sont encore à l'étude. Cette réglementation intégrera pour la première fois des exigences sur les émissions de GES évaluées sur le cycle de vie afin d'inciter la conception de bâtiments bas carbone dans la construction neuve. Le bâtiment zéro-énergie (BZE) et le BEPOS se caractérisent par une bonne performance thermique de l'enveloppe et une production d'énergie sur site dont le surplus est généralement exporté

sur le réseau. La maîtrise des coûts de construction est donc essentielle pour assurer le bon développement de ces bâtiments à l'échelle nationale. Aujourd'hui, les concepteurs peuvent choisir parmi une offre diversifiée de solutions techniques afin de répondre à ces nouvelles exigences : dans les types de structure et les matériaux employés, dont des matériaux bio-sourcés et bas carbone, dans les types de vitrages innovants, dans les équipements de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC), et dans les moyens de production d'énergies solaires thermiques et photovoltaïques, pour ne citer que ces catégories principales.

Positionnement du sujet

Des outils de modélisation performants comme la simulation énergétique dynamique (SED) et l'analyse de cycle de vie (ACV) peuvent aider les concepteurs et décideurs à faire les meilleurs choix de conception en termes de performances énergétiques et environnementales. L'ACV permet notamment d'évaluer de manière holistique les impacts environnementaux d'un projet sur son cycle de vie et selon de multiples indicateurs. Pour aller plus loin dans la recherche de solutions optimales, des algorithmes d'optimisation multicritère sont aujourd'hui disponibles et utilisables conjointement avec les outils de SED et d'ACV. Cette méthode permet d'identifier rapidement et automatiquement des solutions optimales parmi un ensemble de paramètres de conception, afin de répondre aux attentes et aux contraintes des décideurs, tant sur des critères économiques, qu'énergétiques et environnementaux.

L'usage de l'optimisation multicritère est prometteur pour maîtriser les coûts de construction et participer à une démarche d'écoconception qui minimise les impacts environnementaux du bâtiment. Néanmoins, comme toute démarche d'aide à la décision basée sur des modèles, la problématique des incertitudes pèse sur la fiabilité des résultats. Ces incertitudes proviennent de la précision du modèle et des données employées, de sources de variabilités naturelles incontrôlables, et d'hypothèses ou d'erreurs dans la modélisation. Par ailleurs, en phase de conception, l'ACV est utilisée dans une approche prospective qui introduit des incertitudes liées à l'évolution future du bâtiment. Elles sont renforcées par sa longue durée de vie, qui dépasse généralement les 50 à 80 ans, et les interactions complexes qu'il entretient avec d'autres systèmes dynamiques tels que les

réseaux de distribution d'énergie ou le climat. Ces diverses sources d'incertitudes devraient être propagées dans une ACV de bâtiment pour améliorer la fiabilité des résultats et éco-concevoir des bâtiments plus robustes dans le temps.

Objectifs scientifiques

Les travaux de cette thèse ont pour objectif de proposer une démarche d'optimisation multicritère sous incertitudes pour l'écoconception de bâtiments zéro-énergie robustes à coût de construction maîtrisé. Cet objectif s'accompagne de l'identification des incertitudes du cycle de vie d'un bâtiment qui peuvent affecter la fiabilité à long terme de sa performance énergétique et de son bilan environnemental. La procédure d'optimisation multicritère du bâtiment a un coût calculatoire élevé à cause des milliers simulations qui sont effectuées, et peut durer jusqu'à une dizaine d'heures selon la taille du bâtiment étudié. Une méthode d'ACV de bâtiment contenant une propagation des incertitudes doit être construite de manière à considérer seulement les incertitudes les plus significatives et à limiter les temps de calculs supplémentaires en vue d'un usage en optimisation multicritère robuste de bâtiment.

Démarche proposée

Pour répondre à ces objectifs, **le premier chapitre** vise à établir un état de l'art autour des nombreuses composantes de la problématique de l'optimisation multicritère robuste de bâtiment. Les caractéristiques de l'écoconception et du bâtiment zéro-énergie sont d'abord définies. Puis, une vue d'ensemble est donnée sur la démarche de l'ACV et ses spécificités dans des applications au bâtiment. Elle permet d'identifier les développements clés dans la prise en compte des aspects dynamiques et prospectifs caractéristiques du cycle de vie d'un bâtiment. Un état de l'art des méthodes d'optimisation multicritère appliquées au bâtiment est réalisé afin d'identifier ses principaux enjeux, notamment liés à la prise de décision et aux temps de calcul. Enfin, ce chapitre explore la question des incertitudes en ACV et en écoconception de bâtiment, ainsi que les méthodes de prise de décision et d'optimisation sous incertitudes.

Le **deuxième chapitre** présente les méthodes et les outils sur lesquels porteront les développements de ces travaux de thèse. Une première amélioration est apportée à la

fiabilité des résultats d'ACV en mettant à jour les données d'inventaire de cycle de vie et les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux qui sont employées. Le cas d'étude est ensuite présenté et la méthode d'ACV est appliquée pour réaliser son évaluation environnementale.

Le **troisième chapitre** se consacre à l'application de la méthode initiale d'optimisation multicritère sur le cas d'étude, avec une comparaison des résultats sous différentes hypothèses liées aux paramètres de conceptions à optimiser et à la définition du bilan zéro-énergie.

Le **quatrième chapitre** présente les développements apportés à une approche prospective d'ACV dynamique du bâtiment basée sur la propagation de scénarios. Ces développements concernent la prise en compte de trajectoires d'évolutions possibles sur des paramètres incertains influents afin de construire des cycles de vie alternatifs et cohérents du bâtiment. La méthode a un coût calculatoire limité qui permet son application dans une démarche d'optimisation multicritère robuste.

Enfin, le **cinquième chapitre** illustre cette démarche en l'appliquant au cas d'étude avec différentes hypothèses liées à la robustesse du bâtiment zéro-énergie.

À l'issu de ce manuscrit et des résultats obtenus, une conclusion et plusieurs perspectives sont proposées quant aux apports et aux limitations de cette méthode.

1 PROBLÉMATIQUE ET ÉTAT DE L'ART

Ce chapitre introductif présente les éléments de compréhension de la problématique de ces travaux de thèse, à savoir l'optimisation multicritère robuste dans le contexte décisionnel de l'écoconception de bâtiment zéro-énergie (BZE). La section 1.1 présente une perspective historique de la conception de bâtiments et de l'analyse de cycle de vie (ACV), puis le déroulement d'une phase de conception type ainsi que les questions liées à l'intégration de l'écoconception dans cette démarche. La section 1.2 présente les définitions du BZE dans la directive européenne et dans la littérature scientifique ainsi que sa possible formulation dans la future réglementation française. La section 1.3 présente L'ACV et la simulation énergétique dynamique (SED) qui les méthodes principales utilisées en écoconception. La section 1.4 introduit l'optimisation multicritère de bâtiment d'abord dans ses aspects théoriques puis dans ses applications et développements en écoconception de bâtiments. La section 1.5 aborde la question des incertitudes et de la fiabilité des résultats en ACV de bâtiments, l'aide à la décision sous incertitudes, l'optimisation multicritère robuste et ses applications.

1.1 La conception et l'écoconception des bâtiments

1.1.1 Résumé historique

En tous lieux de la planète, profitant de milliers d'années de recherches, essais et erreurs, les savoir-faire traditionnels ont permis de construire des habitats adaptés à leur environnement, tant par les matériaux employés (terre, pierre, bois, neige) que dans des formes permettant de profiter passivement du microclimat ambiant. L'igloo inuit au Groenland et l'habitat mozabite en Algérie sont deux exemples extrêmes de constructions traditionnelles bioclimatiques qui ont assuré un certain confort thermique à leurs occupants. La première mise sur une gestion efficace de la ventilation malgré un air extérieur à -30°C, grâce notamment à l'emploi d'un siphon thermique dans le tunnel d'entrée. Elle permet ainsi d'atteindre une température d'ambiance de 20°C à l'intérieur. La seconde, malgré des températures pouvant dépasser les 45°C à l'extérieur, profite de l'inertie de murs en terre crue, du tirage thermique naturel et de jarres d'eau poreuses qui assurent une ventilation passive rafraîchissante (Armand Dutreix, 2010). Or, depuis la révolution industrielle et ce qu'elle a permis d'abondance énergétique, les activités de construction se sont accélérées parallèlement à la productivité économique et à la démographie. Les pratiques bioclimatiques et traditionnelles ont peu à peu disparues de nos sociétés au profit de bâtiments plus simples, plus rapides à construire et plus économiques. En 1948 est construite la première maison moderne chauffée à 75 % à l'énergie solaire à Douvres dans le Massachusetts, conçue par la chercheuse du MIT Maria Telkes[1] qui a été très active dans la recherche sur le stockage d'énergie solaire. Mais cette avancée n'arrive pas à s'inscrire dans la dynamique de forte urbanisation de l'époque. Le premier choc pétrolier de 1973 a mis un premier coup d'arrêt à cette tendance et a encouragé la réduction de la consommation d'énergie avec la toute première réglementation thermique du bâtiment française en 1974 qui vise à réduire les déperditions thermiques via une meilleure isolation. C'est aussi à cette époque qu'émergent de plus en plus d'expérimentations et de recherches sur la valorisation de l'énergie solaire et le

[1] https://www.britannica.com/biography/Maria-Telkes

bioclimatisme (Peuportier, 2008). En 1980, la première maison fonctionnant à l'énergie photovoltaïque est construite à Carlisle dans le Massachusetts à laquelle a également participée Maria Telkes (Citation 1.1).

10449 **(DOE/ET/20279—143) Carlisle house: an all-solar-electric residence.** Nichols, B.E. (Massachusetts Inst. of Tech., Lexington (USA). Lincoln Lab.). Oct 1981. Contract AC02-76ET20279. 25p. NTIS, PC A02/MF A01. Order Number DE82004376.

The first solar photovoltaic house designed and constructed under the US Department of Energy's Solar Photovoltaic Residential Project has been completed. The house, which is powered by a 7-kWp photovoltaic system, will be used to assess the occupants' acceptance of and reactions to residential photovoltaic systems and to familiarize utilities, builders, developers, town building officials and others with issues concerning photovoltaic installations. The house is located on a two-acre lot in Carlisle, Massachusetts, approximately twenty miles northwest of Boston. Built by a local architect/developer team, the house includes energy conservation and passive solar features. It utilizes a roof-mounted, flat-plate PV array which operates in a two-way energy exchange mode with the electric utility. The energy conservation and passive solar features of this house are described and detailed description of the utility-interactive photovoltaic system is presented, along with initial performance data.

Citation 1.1 – Abstract à propos de la première maison à l'énergie PV. Issu de Energy Research abstracts, vol 7 n°5, p.1286, 15 mars 1982.

En Suède et au Danemark des politiques plus exigeantes rendent obligatoires les bâtiments « basse consommation » dans les années 1980. En 1988 en France, la troisième réglementation thermique intègre un critère de consommation d'eau chaude sanitaire et de chauffage en plus des déperditions. En parallèle Wolfgang Feist et Bo Adamson travaillent sur le concept de maison passive dont le premier prototype émerge en 1991 à Darmstadt (Feist, 2014), misant sur une étanchéité et une isolation très performantes du bâtiment. La réglementation thermique française est modifiée en 2000 pour prendre en compte un critère de confort des occupants. La dernière version en date de la réglementation, la RT2012, impose une consommation énergétique maximum de 50 kWh/m².an et des exigences sur l'efficacité bioclimatique de l'enveloppe, la consommation énergétique du bâtiment et le confort d'été.

Au début des années 1970 émergent les prémices de l'analyse de cycle de vie (ACV), d'abord aux États-Unis puis parallèlement en Europe (Hunt et al., 1996 ; Boustead, 1996).

Aux États-Unis les premiers travaux s'intéressent d'abord à la réduction des déchets solides et de la consommation d'énergie dans les procédés de fabrication industriels, notamment liés aux emballages et contenants jetables ou réutilisables. À cette époque, l'ACV était principalement employée dans le secteur privé et la majorité des études étaient confidentielles. Le secteur public y portait peu d'intérêt à cause du manque de fiabilité des données et résultats et d'une attention portée principalement sur les déchets toxiques et radioactifs. À partir de 1988, la problématique environnementale générale émerge fortement dans le débat public portée par des organisations environnementales qui poussent à l'action les multinationales et décideurs publics. En 1990, la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) lance le premier atelier de discussions de professionnels et chercheurs autour de l'analyse de cycle de vie, à l'issue duquel le terme est officiellement adopté. Autour de cette même période, la pratique de l'écoconception de produits gagne en popularité et peut s'appuyer sur une utilisation de l'ACV qui gagne en maturité. La première mise en œuvre de l'ACV pour l'écoconception de bâtiments remonte à 1986 et portait sur l'énergie (Kohler, 1986). En 1997, des travaux de recherche ont permis d'aboutir à un cadre méthodologique de l'ACV de bâtiment (Peuportier et al., 1997). En 1998 est publiée la première norme ISO 14040 de l'ACV. Les dernières normes ISO qui établissent les principes et exigences d'une démarche en ACV datent de 2006 (International Organization for Standardization, 2006a ; 2006b), puis en 2011 est publiée une norme européenne de l'ACV de bâtiments (Comité Européen de Normalisation, 2011).

1.1.2 Les étapes de la phase de conception

La conception d'un bâtiment se déroule en plusieurs étapes, depuis le programme jusqu'au lancement de la construction. Ces étapes sont décrites ci-après.

1.1.2.1 Programmation et études préalables

Le maître d'ouvrage évalue les besoins, les objectifs et les contraintes de son projet avec l'aide d'une assistance à maîtrise d'ouvrage. Les études de diagnostic sont réalisées par des géomètres et ingénieurs. Les spécificités du projet sont inscrites dans un programme qui définit les objectifs, les contraintes, les exigences de qualité sociale, urbanistique, architecturale, fonctionnelle, technique, économique, d'insertion dans le

paysage et de protection de l'environnement. Ce programme contient notamment la hiérarchie des objectifs, les performances à atteindre, l'affectation des espaces, les contraintes de délais et de coûts.

1.1.2.2 Concours ou esquisse

L'équipe de maîtrise d'œuvre composée de l'architecte et des bureaux d'études propose les premiers plans et premières maquettes du projet. Cette étape permet de vérifier la faisabilité du programme souhaité par le maître d'ouvrage et l'insertion du projet dans le site. L'équipe de maîtrise d'œuvre peut proposer différentes options de conception et réalise leurs premières estimations financières. Si le maître d'ouvrage est satisfait des études d'esquisses il peut décider de poursuivre les travaux dans la phase d'avant-projet.

1.1.2.3 Avant-projet sommaire (APS)

Le projet et le budget sont réajustés et adaptés, par exemple pour répondre à certaines réglementations. Des concertations avec les usagers peuvent être réalisées.

1.1.2.4 Avant-projet détaillé (APD)

Les caractéristiques architecturales et techniques définitives sont arrêtées. L'ensemble des travaux est précisé, le planning et les estimations financières sont finalisés et le dossier de demande de permis de construire est constitué.

1.1.2.5 Permis de construire

Le dossier de demande de permis de construire est soumis aux autorités compétentes. Il contient les documents techniques, plans, définitions des matériaux, réseaux, fluides, documents administratifs et juridiques, et attestation de conformité avec la réglementation thermique. Le projet doit respecter les règles locales d'urbanisme concernant notamment : l'implantation de la construction, sa fonction, son aspect extérieur et l'aménagement de ses abords.

1.1.2.6 Études phase projet

Une fois le permis reçu, l'équipe de maîtrise d'œuvre prépare les plans détaillés de tous les niveaux du bâtiment ainsi que les façades, les perspectives et les mesures. Ce plan

doit être le plus compréhensible et détaillé possible car il servira à établir le dossier de consultation des entreprises (DCE). Les entreprises s'appuient sur ce dossier pour établir leurs devis en fonction des interventions sur le chantier qui ont été fixées. Le maître d'œuvre choisit les entreprises sur la base de leurs propositions financières et techniques. Le chantier de construction peut alors démarrer.

1.1.3 Quelle place pour l'écoconception en phase de conception ?

Les étapes de la programmation, de l'esquisse et de l'APS offrent le plus de liberté et d'incertitudes dans les choix de construction. Ils ont par conséquent une influence majeure sur les performances futures du bâtiment. Dans les étapes ultérieures certains choix de conception seront difficiles, voire impossibles à modifier comme par exemple l'orientation du bâtiment ou la forme du bâti qui ont pourtant des conséquences très importantes sur les performances énergétiques et environnementales du projet. Il sera possible de corriger des défauts de conception durant ces étapes ultérieures grâce à divers dispositifs techniques, mais cette solution peut s'avérer coûteuse, lourde à mettre en œuvre et d'une efficacité incertaine. L'écoconception doit donc être intégrée dans le projet le plus tôt possible. Néanmoins cette intégration connaît plusieurs freins identifiés par Lamé et Leroy (2015) et Lamé et al. (2017) à partir d'entretiens avec des professionnels de la construction et de l'écoconception :

- Les motivations environnementales des acteurs du projet sont inégales. Ils n'ont pas les mêmes sensibilités et intérêts pour la réduction des impacts environnementaux. De plus, l'écoconception peut s'accompagner de l'idée qu'elle augmente les coûts et la complexité du projet sans réel retour sur investissement pour l'entreprise. Haned et al. (2014) ont réalisé une étude auprès de 119 entreprises françaises et canadiennes de divers domaines d'activité. Pour 96% d'entre-elles l'écoconception a eu un impact positif (45%) ou neutre (51%) sur leur rentabilité. Par ailleurs, les retombées ne sont pas seulement économiques, elles sont aussi sociales, améliorent l'image publique et la capacité à innover. Même si elle génère de la rentabilité, l'écoconception nécessite un coût d'investissement plus élevé qui n'est pas toujours possible pour les PME. Un certain nombre d'entreprises interrogées par Haned et al. (2014) évoquent le besoin

d'avoir plus d'accompagnement de la part des pouvoirs publics, que ce soit de nature financière, ou par des programmes de formation et de sensibilisation à l'écoconception.

- Il existe des difficultés techniques et un manque de compétences. L'écoconception requiert l'utilisation d'outils dédiés, souvent basés sur l'analyse de cycle de vie, qui implique l'usage de bases de données qui peuvent être coûteuses ou incomplètes. Le manque de standardisation représente une difficulté pour les acteurs : il n'existe pas de cadre de référence auquel le projet pourrait être comparé. De plus, il manque des outils opérationnels qui fournissent une aide réelle à la décision multicritère.
- L'écoconception est une approche qui ne s'insère pas assez tôt dans le processus de conception. Les outils actuels sont considérés comme lourds et peu adaptés aux phases amont de conception où l'information concernant le bâtiment est encore incomplète et incertaine. Aujourd'hui, les outils ACV sont le plus souvent utilisés pour évaluer *a posteriori* des solutions de conception. Or, une expertise suffisante de l'écoconception et des outils permet de contourner ces problèmes et de faire des propositions dès le début de la conception.

Intégrer un expert environnemental à toutes les étapes de la conception permettrait de surpasser ces freins. Son rôle pourrait être de guider vers des solutions à faibles impacts environnementaux et de mettre en garde contre des choix qui ne vont pas dans ce sens dès la phase de programmation. Ce rôle peut être porté aujourd'hui par l'AMO environnemental qui conseille le maître d'ouvrage et vérifie les études de l'équipe de maîtrise d'œuvre. Des professionnels AMO interrogés par Lamé et Leroy (2015) regrettent de n'intervenir qu'assez tard dans le processus de conception aux phases APS et APD. Ils sont généralement en charge des certifications, apportent des recommandations quant à l'évolution des normes et aux solutions techniques innovantes. Par ailleurs, il existe bien des bureaux d'études environnementaux parmi l'équipe de maîtrise d'œuvre mais leur champ d'action sur les performances du bâtiment reste restreint. Le processus actuel de la conception de bâtiment (Figure 1.2) doit être adapté afin d'accorder une place plus importante et amont à ces experts environnementaux. Ces acteurs pourraient alors mettre à profit leurs compétences dans l'utilisation des outils d'écoconception et dans l'aide à la décision multicritère dès la phase cruciale de programmation et influencer fortement les performances du futur bâtiment.

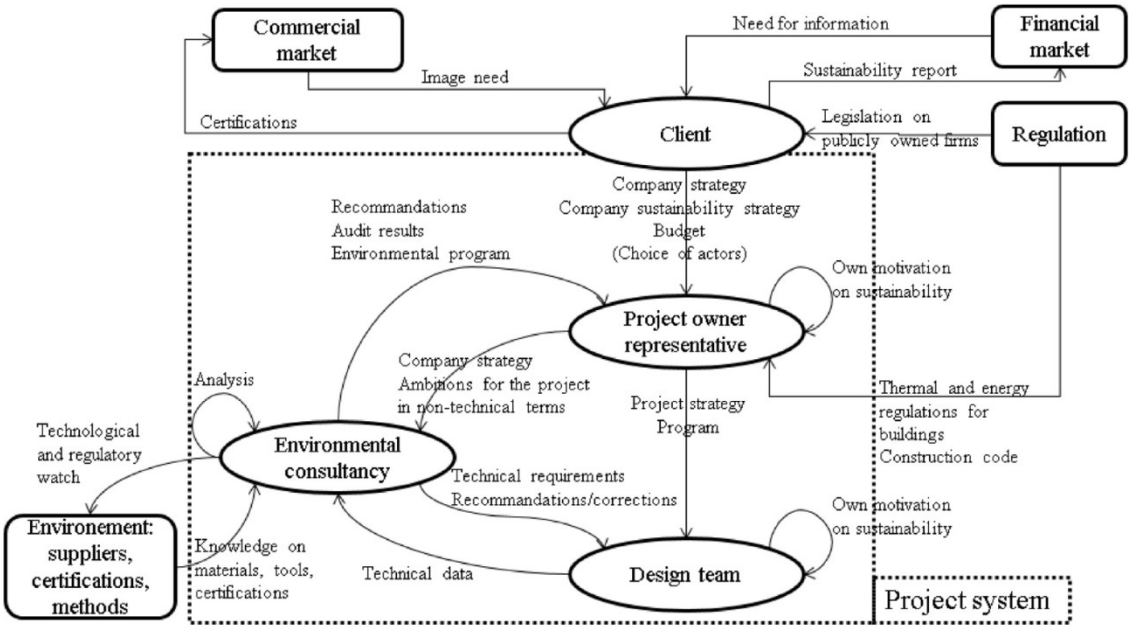


Figure 1.2 – Positionnement des aspects environnementaux en phase de conception du bâtiment (Lamé et al. 2017)

L'intégration de l'écoconception dans les projets de construction repose donc à la fois sur l'adaptation aux pratiques actuelles des outils et des méthodologies développées dans la recherche scientifique, à la création d'outils suffisamment simples et vulgarisés pour que l'ensemble des professionnels du bâtiment puissent intégrer les aspects environnementaux à leur prise de décision, et à l'intégration d'un nouvel acteur expert en écoconception qui dès la phase cruciale de programmation. Cela s'accompagne également de programmes de sensibilisation et de formation à ces questions. Peuportier (2008) propose une synthèse des principales actions pouvant être menées pour intégrer la qualité environnementale avant la phase de programmation et durant toute la conception.

1.2 Le bâtiment zéro-énergie

1.2.1 Le bâtiment zéro-énergie d'après la réglementation européenne

Dans un contexte de transition énergétique et environnementale nécessaire au développement durable de nos sociétés, les efforts de réduction de la consommation énergétique des bâtiments se sont multipliés ces dernières années. D'un point de vue

réglementaire, la commission européenne a adopté en 2010 la Directive sur la performance énergétique des bâtiments (European Parliament et Council of the European Union, 2010) qui définit et impose aux Pays membres la construction neuve de « *nearly zero energy buildings* » ou « *nZEB* », traduit dans la suite « bâtiment zéro-énergie » ou « BZE », à partir du 1er janvier 2021. L'article 2 de la Directive sur la performance énergétique des bâtiments définit le bâtiment zéro-énergie :

- « Un bâtiment qui a des performances énergétiques très élevées déterminées conformément à l'annexe I. La quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devra être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité ».
- L'annexe I stipule : « la performance énergétique d'un bâtiment est déterminée sur la base de l'énergie calculée ou réelle consommée annuellement afin de satisfaire les différents besoins relatifs à son utilisation normale et doit refléter les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation (énergie nécessaire pour éviter une température excessive) permettant de maintenir les conditions de température prévues du bâtiment, et les besoins domestiques en eau chaude ».
- La performance énergétique d'un bâtiment correspond à la quantité d'énergie calculée ou mesurée nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques liés à une utilisation normale du bâtiment, ce qui inclut entre autres l'énergie utilisée pour le chauffage, le système de refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude et l'éclairage.

La directive met essentiellement en place quelques fondements qualitatifs : un bâtiment à haute efficacité énergétique, une production d'énergie de sources renouvelables qui permet d'équilibrer le bilan annuel d'énergie à zéro (ou presque), et un indicateur énergétique qui doit être exprimé en énergie primaire. Chaque État doit alors élaborer son plan national et ses exigences en fonction de son contexte propre.

Pour définir leurs exigences de performances, les États membres doivent s'appuyer sur la méthodologie de calcul établie par la Commission européenne qui permet d'établir les niveaux optimaux de performance en fonction des coûts des exigences minimales en

vigueur. Hamdy et al. (2017) font une revue de la littérature qui montre que pour plusieurs pays européens (Belgique, Pologne, Autriche, Allemagne…), les optimums économiques globaux, obtenus grâce à la méthodologie de la Commission européenne, ont de meilleures performances énergétiques que les exigences minimales réglementaires actuelles tout en étant moins coûteux. Les performances peuvent être améliorées de 10 à 40 % par rapport aux standards nationaux pour une réduction des coûts jusqu'à 15%. Pour soutenir les États membres dans la transposition de la directive en une réglementation nationale, la Commission a mandaté le comité européen de normalisation afin d'établir un cadre normatif (Comité Européen de Normalisation, 2013 ; Zirngibl, 2014).

1.2.2 Cadre de définition du bâtiment zéro-énergie dans la littérature

Le bâtiment zéro-énergie n'a pas encore trouvé de consensus dans la littérature scientifique qui contient de nombreuses définitions différentes. Dans leur revue de la littérature, Athienitis et al. (2015) proposent : « un bâtiment zéro-énergie est défini comme un bâtiment qui, en moyenne sur l'année, produit autant d'énergie de sources renouvelables (électrique et thermique) qu'il n'en consomme au total. La définition la plus stricte impose la production d'énergie sur site ». Si on peut établir un critère quantitatif à partir de cette description (bilan nul annuellement), d'autres aspects restent à définir explicitement. Quels sont les seuils de tolérance de ce bilan ? Quels usages comprennent la partie consommation ? La partie production comprend-elle seulement l'autoconsommation ou aussi l'export ? S'agit-il d'énergie primaire, finale ou d'autre chose ? Quels coefficients ou poids sont attribués aux vecteurs énergétiques selon qu'ils soient renouvelables ou non ? Ces questions correspondent à quelques-uns des critères de définition d'un bâtiment zéro-énergie.

À partir de revues de la littérature, Marszal et al. (2011) et Sartori et al. (2012) proposent une liste des différents critères et aspects qui servent à définir un bâtiment zéro-énergie (Tableau 1.1). Marszal et al. (2011) comparent douze méthodologies proposées par des chercheurs impliqués dans le programme IEA SHC Task 40/ECBS Annex 52 appelé « *Towards Net Zero Energy Solar Building* » et identifient ces huit points clés :

- indicateur du bilan zéro-énergie ;

- période d'évaluation du bilan ;
- usages énergétiques inclus dans le bilan (frontières du bilan) ;
- type de bilan ;
- options de fourniture en énergies renouvelables ;
- connexion à des réseaux d'énergie ou indépendance du bâtiment ;
- efficacité énergétique ;
- interactions entre le bâtiment et le réseau.

Sartori et al. (2012) complètent ce cadre en ajoutant les aspects suivants : la frontière physique (bâtiment ou ensemble de bâtiments) ; les conditions aux limites du système ; la symétrie des échanges avec les réseaux ; des indicateurs qui caractérisent l'aspect temporel de la couverture énergétique locale ; un plan de mesures et vérification. Dans la suite, nous passons en revue les critères de définitions du bâtiment zéro-énergie.

1.2.2.1 Connexion du bâtiment au réseau

Ce critère indique si le bâtiment est connecté à un réseau d'énergie. Généralement, il s'agit d'un réseau électrique mais cela peut aussi être un réseau de gaz, un réseau de chaleur urbaine ou un réseau de froid. Le terme plus large « *zero energy building* » (*ZEB*) regroupe les bâtiments connectés au réseau et les bâtiments autonomes. Le « *net zero energy building* » (*NZEB*) est très évoqué dans la littérature scientifique et désigne un bâtiment connecté à au moins une infrastructure énergétique, avec laquelle il peut avoir des échanges d'énergie (Sartori et al. 2012).

Le bâtiment zéro-énergie autonome est peu avantageux et non recommandé dans un contexte européen où la plupart des réseaux énergétiques sont denses et fiables. L'impossibilité d'exporter le surplus de production serait aussi contraire à l'esprit de la directive européenne sur la performance énergétique du bâtiment qui vise à favoriser la participation des bâtiments zéro-énergie à la transition énergétique. Par ailleurs, un bâtiment autonome aura naturellement besoin de plus de systèmes pour la production et le

stockage d'énergie afin d'assurer le bilan d'énergie annuel nul à cause de la saisonnalité des besoins des occupants et des apports solaires.

Tableau 1.1 - Cadre de définition du NZEB selon (Sartori et al., 2012)

Critère principal	Sous-critères
Frontières du système	• Frontière physique • Frontière du bilan • Conditions aux limites
Système de pondération	• Indicateur et coefficients de pondération • Symétrie avec le réseau • Variation temporelle des coefficients
Bilan zéro-énergie	• Période du bilan • Type de bilan • Efficacité énergétique • Fourniture d'énergies renouvelables
Caractéristiques temporelles de la couverture énergétique	• Taux de couverture énergétique • Indicateur d'interaction avec le réseau
Mesure et vérification	

1.2.2.2 Frontières du système

La frontière physique d'un bâtiment zéro-énergie permet d'identifier les systèmes de production d'énergie qui sont « sur-site » ou « hors-site » (voir « fourniture d'énergie renouvelable »). Dans certains cas la frontière physique peut concerner un ensemble zéro-énergie de bâtiments dans lequel des bâtiments connectés entre eux ne respectent pas nécessairement ce critère.

Dans la partie consommation, la **frontière du bilan** énergétique délimite les différents usages de l'énergie qui sont inclus ou non dans le bilan zéro-énergie. Ces cinq usages principaux sont généralement inclus : chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire,

éclairage et consommation des auxiliaires (ventilation et équipements techniques). Il n'existe pas de consensus sur la prise en compte de l'énergie liée aux usages spécifiques des occupants : électroménager, ordinateurs, cuisine, etc. La directive européenne ne la considère pas dans le bilan zéro-énergie. Néanmoins avec l'amélioration des performances thermiques, les usages spécifiques peuvent représenter la majorité de la consommation d'un bâtiment neuf. Ces usages produisent par ailleurs des apports thermiques qui influent sur les besoins de chauffage et de climatisation. Enfin, l'autoconsommation concerne tous les usages de l'électricité ; ne pas considérer les usages spécifiques fausserait l'évaluation de la partie consommation. La frontière du bilan peut également inclure les systèmes de production d'énergie renouvelables dont la production est considérée dans le bilan[2].

Les conditions aux limites déterminent les conditions de fonctionnement du bâtiment : le site, l'usage (p. ex. résidentiel, tertiaire), le type et nombre d'usagers, la morphologie, le climat, les standards de confort, etc. Ces informations sont indispensables pour pouvoir comparer des projets entre eux.

1.2.2.3 Système de pondération

Un système de pondération est composé de coefficients de pondération permettant de convertir les usages de différents vecteurs énergétiques (électricité, gaz, bois…) dans un indicateur unique. Il se caractérise également par une manière de prendre en compte des exports (compensation/symétrie) et par le pas temporel des coefficients (annuels, mensuels, horaires).

L'indicateur le plus fréquemment utilisé est celui qui exprime une équivalence en énergie primaire. Il est notamment utilisé dans la réglementation thermique française (Cep) et il est recommandé par la directive européenne sur la performance du bâtiment. L'énergie primaire comprend l'entièreté des processus énergétiques, de l'extraction des sources d'énergie, aux procédés de conversion, aux transports et aux réseaux de distribution.

[2] https://www.buildup.eu/en/news/overview-zero-energy-buildings-does-definition-influence-their-design-and-implementation

L'indicateur d'énergie finale est un autre indicateur qui correspond à l'énergie qui est délivrée au bâtiment.

Les coefficients de pondération convertissent les quantités de vecteurs énergétiques vers l'indicateur choisi. La détermination des coefficients de pondération peut être subjective dans le but de favoriser ou décourager l'usage de certains vecteurs énergétiques. Attribuer un coefficient relativement faible à un vecteur énergétique particulier va encourager sa consommation et décourager sa production. Un choix plus scientifique est d'attribuer des coefficients à partir des données d'ACV.

La symétrie consiste à donner le même coefficient de pondération à l'import et à l'export d'un vecteur énergétique sur le réseau. La symétrie signifie que l'énergie exportée sur le réseau se substitue à une production équivalente sur le réseau. Dans une approche asymétrique un même vecteur énergétique importé et exporté n'est pas pondéré des mêmes coefficients.

La résolution temporelle des coefficients dépend de l'agrégation temporelle qui est choisie : annuelle, mensuelle, horaire. Une agrégation temporelle à l'échelle de l'année est trop grossière pour rendre compte notamment des pointes hivernales et journalières. Des coefficients de pondération mensuels représentent relativement bien les variations saisonnières tandis que l'échelle horaire retranscrit mieux les pointes journalières.

1.2.2.4 Bilan zéro-énergie

La période sur laquelle est effectué le bilan zéro-énergie est le plus souvent une année, ce qui est aussi préconisé par la directive européenne sur la performance du bâtiment. L'usage d'autres périodes comme les mois, le cycle de vie ou quelques années peuvent mener à des choix de conception différents. Dans le cas d'un bilan annuel, la production d'électricité photovoltaïque estivale permet d'équilibrer la consommation hivernale. Un bilan mensuel nul pourrait être plus exigeant sur l'isolation thermique et la capacité de production renouvelable pour répondre aux pointes hivernales. Une période de cycle de vie ou de plusieurs années pourrait inclure l'énergie grise dans le bilan, dont une alternative est d'annualiser ces consommations et de les compter dans un bilan annuel.

Trois types de bilans sont proposés par Sartori et al. (2012). Ils sont relatifs à la frontière physique évoquée précédemment (Figure 1.3). Le bilan de type « *load/generation* » se situe à l'intérieur de la frontière physique du bâtiment. Dans ce type de bilan la consommation est entièrement couverte par de l'import et toute la production est exportée. Le deuxième bilan « *import/export* » prend en compte la part d'autoconsommation et l'export. Un troisième bilan appelé « *monthly net balance* » est basé sur des bilans mensuels de type « *load/generation* » mensuels. La production d'énergie n'est pas considérée de la même manière suivant le type de bilan adopté. Du point de vue du bilan « *import/export* », la production se traduit par de l'autoconsommation qui réduit la quantité d'énergie importée du réseau, elle est donc considérée comme une mesure d'efficacité énergétique pour le bâtiment et le réseau. En bilan « *load/generation* », la production est considérée indépendamment de la consommation du bâtiment.

1.2.2.5 Efficacité énergétique

Un bâtiment zéro-énergie exige des niveaux minimaux d'efficacité énergétique. Ces exigences peuvent être des caractéristiques normatives, des performances à respecter, ou les deux. Les caractéristiques normatives peuvent être des valeurs du coefficient d'échange U des murs et des fenêtres, un niveau d'étanchéité à l'air, une valeur de COP de pompe à chaleur. Les exigences de performances peuvent porter sur les besoins de chauffage, de climatisation ou sur la consommation totale. Une méthodologie de calcul de la Commission européenne permet aux États membres de définir ces niveaux de performances. Les exigences peuvent également porter sur une réduction de la consommation par rapport à un bâtiment de référence de fonction similaire.

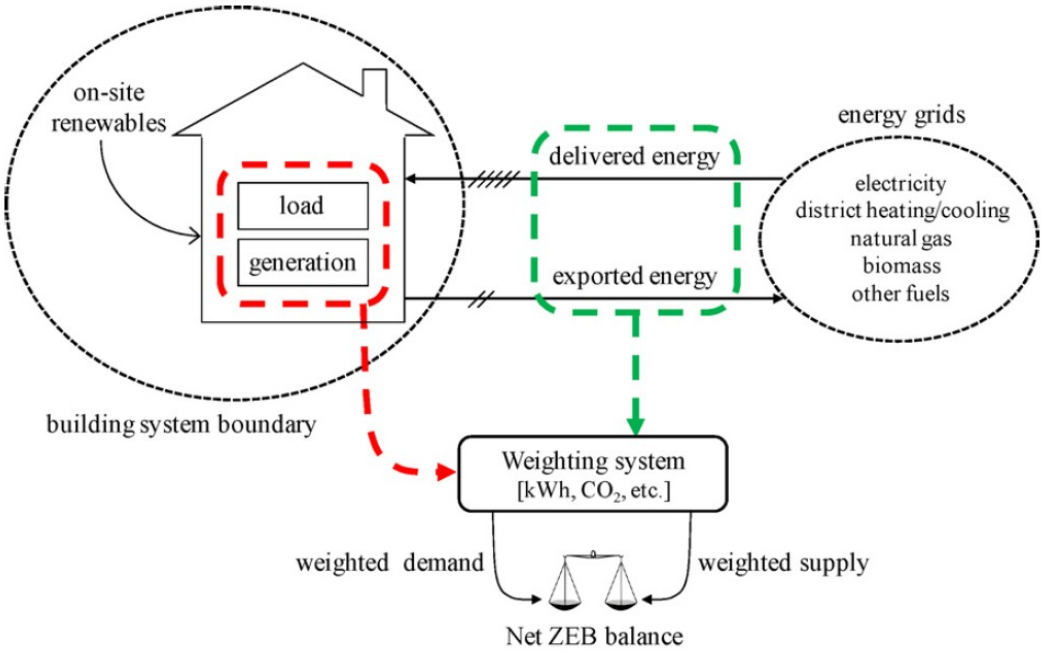


Figure 1.3 - Relations entre la frontière physique du bâtiment et les réseaux d'énergie. Illustration des types de bilan (Sartori et al. 2012)

1.2.2.6 Fourniture d'énergie renouvelable

Une définition du bâtiment zéro-énergie peut imposer une exigence minimale de fourniture en énergie renouvelable. Plusieurs options de fourniture en énergie renouvelable existent et sont divisées en deux grandes catégories : « sur site » et « hors site ». Marszal et al. (2010) classent les types de fourniture d'énergie renouvelable par rapport à leur distance (Figure 1.4 - Les différentes options de fourniture d'énergie renouvelable pour un bâtiment zéro-énergie connecté au réseau (Marszal et al., 2010)). Parmi les possibilités de fournitures « hors site », il existe des solutions financières qui consistent à acheter de l'énergie renouvelable, à investir dans le développement de projets renouvelables ou de rénovation de bâtiments proches. Torcellini et al. (2006) classent les options de fourniture d'énergie renouvelable selon les critères suivants :

- 1) pas d'émissions de CO2, peu de pertes liées au transport ou à la conversion d'énergie ;
- 2) disponibilité sur la durée de vie du bâtiment ;

- 3) disponibilité, reproductibilité, potentiel de développement pour les futurs bâtiments zéro-énergie.

Cette hiérarchie favorise les solutions « sur site » (panneaux photovoltaïques, cogénération) par rapport aux solutions « hors site » (importation de biogaz ou achat d'électricité verte).

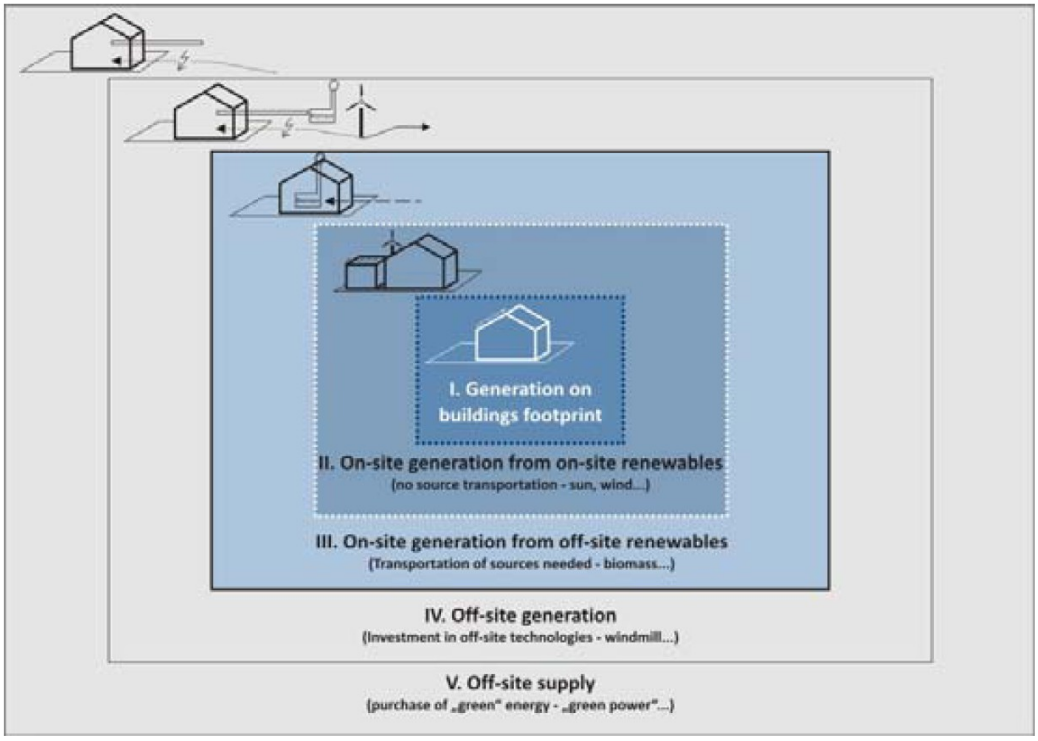


Figure 1.4 - Les différentes options de fourniture d'énergie renouvelable pour un bâtiment zéro-énergie connecté au réseau (Marszal et al., 2010)

1.2.2.7 Caractéristiques temporelles de la couverture énergétique

Voss et al. (2010) définit deux outils d'évaluation de la couverture énergétique du bâtiment : le « taux de couverture énergétique » caractérise la capacité du bâtiment à couvrir ses besoins par autoconsommation, et « l'indice d'interaction avec le réseau » caractérise les échanges entre le bâtiment et le réseau. Ces deux indicateurs doivent être calculés pour chaque vecteur énergétique mis en jeu.

Taux de couverture énergétique

Cet indicateur caractérise la corrélation moyenne entre consommation et production du bâtiment. Un indice élevé signifie que la production du bâtiment peut couvrir sa consommation (non nécessairement en autoconsommation) et donne la capacité d'une meilleure gestion du stockage et de l'export d'énergie. Un indice faible indique que le bâtiment doit beaucoup compter sur le réseau pour équilibrer sa consommation et pour exporter sa production. Le taux de couverture énergétique se calcule de la manière suivante :

$$f_{conso,i} = \frac{1}{N} \times \sum_{année} \min[1, \frac{p_i(t)}{c_i(t)}] \quad (1)$$

avec *p* la production, *c* la consommation, *i* le vecteur énergétique et *t* le temps (heure, jour, mois). *N* correspond au nombre de données sur une année, 8760 dans le cas d'une description horaire. Cet indice est sensible à la résolution du pas de temps décrivant le bâtiment et il convient d'utiliser un pas de temps horaire voire infra-horaire pour calculer un indicateur pertinent (Voss et al., 2010).

Indice d'interaction avec le réseau

Cet indicateur évalue les échanges entre le bâtiment et le réseau. Il représente l'écart-type de l'export net sur l'année normalisé par la valeur maximale de l'export net sur l'année, l'export net étant la différence entre l'export et l'import à chaque pas de temps. L'indice d'interaction avec le réseau est calculé de la manière suivante :

$$f_{réseau,i} = ET[\frac{e_i(t) - d_i(t)}{|\max[e_i(t) - d_i(t)]|}] \quad (2)$$

avec *e* l'énergie exportée, *d* l'énergie importée (« *delivered* »). *ET* correspond au calcul de l'écart-type.

Indice de flexibilité des interactions avec le réseau

Un troisième indicateur est proposé par Salom et al. (2011). Appelé indice de flexibilité des interactions avec le réseau, il évalue la capacité du bâtiment à s'adapter aux signaux du réseau en ajustant ses stratégies de consommation, de production et de stockage pour servir à la fois ses besoins et ceux du réseau. Cette flexibilité est évaluée par la

différence entre deux indicateurs (eq. 5) calculés selon deux situations extrêmes : la première où la priorité est d'exporter un maximum l'énergie produite (les besoins étant couvert par les importations) (eq. 3), la seconde où la priorité est d'exporter le moins possible sur le réseau, l'autoconsommation et le stockage sont donc maximisés (eq. 4).

$$PP_d = \frac{\max\left[E_i(t)\right]}{L} \tag{3}$$

$$PP_e = \frac{\min\left[E_i(t)\right]}{L} \tag{4}$$

$$A = PP_d - PP_e \tag{5}$$

E est le bilan net d'énergie exporté sur le réseau, et *L* la consommation d'énergie du bâtiment.

1.2.2.8 Mesure et vérification

L'évaluation des performances du bâtiment zéro-énergie doit être menée pour vérifier qu'il réponde aux objectifs de performance inscrits dans la réglementation ou définis par le client, l'écoconception visant une performance supérieure au niveau réglementaire. Ces objectifs sont généralement établis sous forme de classement de niveaux de performances. Le niveau de performance du bâtiment peut être évalué par une méthode de calcul (avant travaux) et par une méthode de mesure sur site (après travaux). Cette seconde option permet de vérifier si les performances réelles du bâtiment sont en adéquation avec les objectifs fixés par la réglementation et par le client, ainsi que l'efficience et la robustesse de la solution de conception. Un protocole de mesure et vérification (M&V) doit être établi pour évaluer le bâtiment une fois construit et occupé. Dans le cadre du bâtiment zéro-énergie connecté (*NZEB*), ce protocole de M&V devrait pouvoir évaluer son bilan import/export et éventuellement les caractéristiques temporelles du bâtiment telles que le taux de couverture énergétique et l'indice d'interaction avec le réseau. Il est nécessaire d'établir les caractéristiques de ces mesures : fréquence des mesures, durée de la mesure, nombre d'échantillons et durée d'application du protocole. Le protocole de M&V peut s'avérer complexe et coûteux : suivant les frontières du bilan considérées, les types de mesures et leurs quantités (de nombreux capteurs peuvent être nécessaires pour mesurer des systèmes et des sous-systèmes). Les mesures peuvent concerner la qualité de l'air

intérieur, des usages précis de l'énergie définis par les frontières du bilan, ou par exemple le rechargement d'une voiture électrique qui doit être mesuré séparément.

Il est indispensable de définir la durée et les conditions de validité du bilan zéro-énergie dans le protocole de M&V. Quelle est la durée de validité d'un bilan zéro-énergie vérifié par le protocole ? À quelle fréquence doit être appliqué ce protocole durant le cycle de vie du bâtiment ? Quels sont les niveaux de tolérances et les ajustements du bilan par rapport à la variation des conditions aux limites (occupation, climat...) ? Ces aspects doivent être définis pour assurer aux usagers, aux pouvoirs publics et aux promoteurs des bâtiments fiables et qui respectent leurs exigences durant le cycle de vie. La méthode de la garantie de performance ajustée aux incertitudes sur les conditions d'usage du bâtiment semble être une solution adaptée et généralisable pour répondre à ces défis (Ligier et al., 2017).

1.2.3 Le bâtiment zéro-énergie dans la réglementation française

Le prolongement des dispositions de cette directive en France sera la prochaine réglementation environnementale RE2020 qui s'appliquera aux constructions neuves à partir du 1er janvier 2021. La construction de cette réglementation a pu s'appuyer sur les travaux menés dans le cadre de l'expérimentation E+C- (« énergie positive et réduction carbone »). Dans ce cadre plusieurs acteurs de la filière ont testé et audité des centaines de chantiers de bâtiment afin d'établir un cadre d'évaluation des performances énergétique et environnementale des bâtiments pouvant être mis en œuvre dans la réglementation. Sur le volet énergétique ces travaux ont donné naissance à l'indicateur Bilan Bepos (« Bâtiment à énergie positive »). Ce bilan annuel rassemble les consommations d'énergie primaire non renouvelable du bâtiment sur l'ensemble des usages (y compris les usages spécifiques) et y soustrait la production d'énergie exportée (avec un coefficient d'équivalence en énergie primaire de 1 pour l'électricité). Ainsi, le poids de la consommation d'énergie renouvelable dans ce bilan est de zéro, ce qui peut par exemple poser question sur une éventuelle surconsommation de biomasse. Le Bilan Bepos sert à évaluer la performance énergétique du bâtiment selon une échelle de 1 à 4. Les niveaux *Énergie 1, 2 et 3* correspondent à des consommations généralement supérieures à 100 kWh/m2 et seul le niveau *Énergie 4* peut

s'apparenter au « *nearly zero-energy building* » de la directive européenne. De la même manière une échelle de 1 à 2 est définie sur la performance *Carbone* du bâtiment.

Les exigences de la RE2020 ne seront pas arrêtées avant l'automne 2020 mais certains contours s'en dessinent[3]. L'évaluation de la performance énergétique prendra en compte un indicateur de confort d'été basé sur des degrés-heures d'inconfort. Le risque de l'installation d'une climatisation dans un bâtiment neuf (déclaré non-climatisé) est pris en compte en calculant la consommation supplémentaire que cette action engendrerait. Celle-ci est alors comprise dans le calcul de la consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment (Cep). L'indicateur de performance de l'enveloppe appelé Bbio (incluant les besoins de chauffage, de climatisation et d'éclairage) qui figurait dans la RT2012, ne sera peut-être plus imposé.

Néanmoins, d'autres annonces sont l'objet de vives controverses parmi les différents acteurs de la filière du bâtiment. Par exemple, certains professionnels de l'efficacité énergétique[4] dont l'association Négawatt[5] critiquent plusieurs points :

- Le Bilan Bepos serait relégué à un rôle informatif et non plus normatif, ce qui pourrait être contraire aux dispositions de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments.
- L'indicateur Cep ne devrait pas intégrer les « autre usages de l'électricité » tels que l'électroménager, la cuisson, la bureautique, etc.
- La part d'autoconsommation issue de la production d'énergie renouvelable du bâtiment est comptée négativement dans le Cep mais pas l'export vers le réseau, ce qui pourrait ne pas favoriser l'installation, par exemple, de panneaux photovoltaïques en toitures.
- L'abaissement du coefficient de conversion de l'électricité du réseau français en énergie primaire de 2,58 à 2,3 alors qu'une valeur plus proche de la réalité

[3] http://www.batiment-energiecarbone.fr/

[4] https://www.batiactu.com/edito/re2020-lettre-ouverte-demande-a-etat-redresser-barre-58108.php

[5] https://negawatt.org/RE-2020-une-croix-sur-les-batiments-neufs-performants#nb4

physique calculée en analyse de cycle de vie donne une valeur supérieure à 3,2 (ecoinvent 2.2) voire 3,6 en comptant les pertes sur le réseau.

- L'abaissement de la valeur de l'impact carbone du chauffage électrique passant de 210 à 79 gCO2/kWh ce qui ne représenterait pas la réalité de la pointe hivernale lors desquelles l'électricité produite ou importée est plus carbonée.

Ces deux derniers choix seraient justifiés par la volonté de prendre en compte l'évolution future du mix énergétique. Or, ils déforment la réalité actuelle tandis que la façon dont est considéré un aspect prospectif est entachée d'incertitudes importantes. D'autres critiques concernent la qualité des données utilisées pour la partie analyse de cycle de vie, ou encore le manque de réalisme des scénarios d'usage des occupants, ce qui était déjà pointé du doigt dans la dernière réglementation RT2012. D'autres acteurs de la filière énergie et bâtiment comme l'association Eden (« équilibre des énergies ») soutiennent des positions différentes de celles évoquées ci-avant[6] :

- Pour un abaissement accru du coefficient d'énergie primaire de l'électricité à une valeur de 1, voire le passage à un indicateur d'énergie finale.
- Pour une valeur d'impact carbone de l'électricité qui soit définie par des valeurs mensuelles et identiques à tous les usages.
- Sur la production locale d'énergie, pour la prise en compte dans le Cep seulement de la part d'autoconsommation et pas de l'export comme il a été annoncé jusqu'à présent.
- En lien avec le point précédent ils soutiennent donc la décision de ne pas intégrer normativement le Bilan Bepos en l'état.

Ces positions ambivalentes sont défendues en mettant en avant des conséquences non désirables. L'association Négawatt s'inquiète que de tels choix pourraient favoriser le chauffage par convecteur électrique dans le neuf et impacter la stratégie de rénovation du parc existant en améliorant artificiellement le bilan du diagnostic de performance

[6] https://www.equilibredesenergies.org/12-12-2019-re2020-reaction-equilibre-des-energies-aux-premiers-arbitrages

énergétique des bâtiments se chauffant à l'électricité. L'association Eden pointe du doigt le risque d'aboutir à des bâtiments de type « passoires thermiques » si la totalité de la production d'énergie renouvelable est prise en compte dans le Cep, favorisant une grande surface de panneaux photovoltaïques au détriment de la performance thermique de l'enveloppe.

Ces controverses autour de la construction de la RE2020 mettent en perspective des divergences de fond sur la définition même de ce que devrait être la transposition française du *nearly zero-energy building.* Des différents éléments caractéristiques d'un bâtiment zéro-énergie évoqués dans la section 1.2.2 (frontière du système, bilan annuel, comptage de l'export, système de pondération), les acteurs défendent des choix et des hypothèses précises. Ces choix pouvant être parfois motivés, indifféremment des acteurs, par des aspects politiques défendant ainsi une certaine vision de ce que devrait être le système énergie-bâtiment en France.

Cet exemple pratique illustre sous un certain angle une question qui va jalonner les travaux de cette thèse : comment apporter une aide à la décision fiable et robuste en écoconception de bâtiment zéro-énergie ? Un des éléments de réponse est d'évaluer la robustesse des outils utilisés en écoconception de bâtiment, l'analyse de cycle et de l'optimisation multicritère, au regard de sources d'incertitudes, dont la source subjective des choix et des hypothèses des décideurs.

1.3 L'analyse de cycle de vie

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée d'évaluation des impacts environnementaux de produits, systèmes ou services. Cette approche holistique et multicritère quantifie les impacts d'un produit grâce à un inventaire de cycle de vie (ICV) qui répertorie l'ensemble des substances extraites et émises durant toutes les étapes de son cycle de vie. Des méthodes de caractérisation des impacts sont utilisées pour quantifier la relation entre les flux élémentaires (quantités de substances) de l'ICV et les impacts sur les écosystèmes, la santé humaine ou la raréfaction des ressources. Les impacts sont exprimés selon des catégories de phénomènes physico-chimiques et biologiques, comme par exemple le potentiel de réchauffement global de l'émission de gaz à effet de serre ou le potentiel d'eutrophisation dans les cours d'eau.

L'ACV est holistique car elle évalue toute la chaîne de production, toute la chaîne de conséquences des ressources extraites et des polluants émis, et dans tous les compartiments environnementaux (l'air, la terre, la mer, l'eau douce) à l'échelle globale.

L'ACV est multicritère : les impacts sont évalués selon plusieurs catégories d'effets et de dommages afin de retranscrire de manière exhaustive toutes les conséquences physico-chimiques et biologiques que peut avoir l'émission d'une substance donnée. Ainsi, cette approche permet d'éviter le déplacement d'impact environnemental qui est le fait de réduire les impacts en un point du cycle de vie ou selon un indicateur environnemental, mais de les augmenter à un autre point du cycle de vie ou sur un autre indicateur. En revanche, étant donné que les sources de pollution ne sont pas localisées précisément, l'ACV n'est pas conçue pour la quantification d'impacts locaux et ses résultats ne doivent pas être interprétés en ce sens ; pour une quantification locale la méthode de l'étude d'impact est la plus appropriée. L'ACV est particulièrement utile pour comparer des produits ou décisions alternatives complexes et d'en déduire de manière transparente les leviers d'amélioration de la soutenabilité environnementale.

L'ACV, et de façon plus générale la « pensée en cycle de vie » (*life cycle thinking*), est l'approche scientifique la plus fréquemment utilisée pour la prise de décision, la conception et l'évaluation environnementale. La méthodologie de l'ACV est encadrée par un certain nombre de normes dont les plus importantes sont les ISO 14040:2006 et ISO

14044:2006. Ces normes restent toutefois assez générales, c'est pourquoi l'ILCD (*International Reference Life Cycle Data System*), un centre de recherche commun de la Commission européenne, produit plusieurs documents techniques afin de disséminer les meilleures pratiques de l'ACV. Le guide publié en 2010 (*ICLD Handbook – General guide for LCA detailed guidance*) est une des sources de référence des informations exposées dans cette section sur l'ACV (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010).

1.3.1 Les étapes de l'ACV

La démarche de l'ACV est axée autour de quatre grandes étapes illustrées à la Figure 1.5 Figure 1.5 – Principales étapes de l'ACV définie selon l'ISO 14040:2006:

i. la définition des objectifs et du champ de l'étude ;

ii. la réalisation de l'inventaire de cycle de vie ;

iii. l'évaluation des impacts environnementaux ;

iv. l'interprétation des résultats.

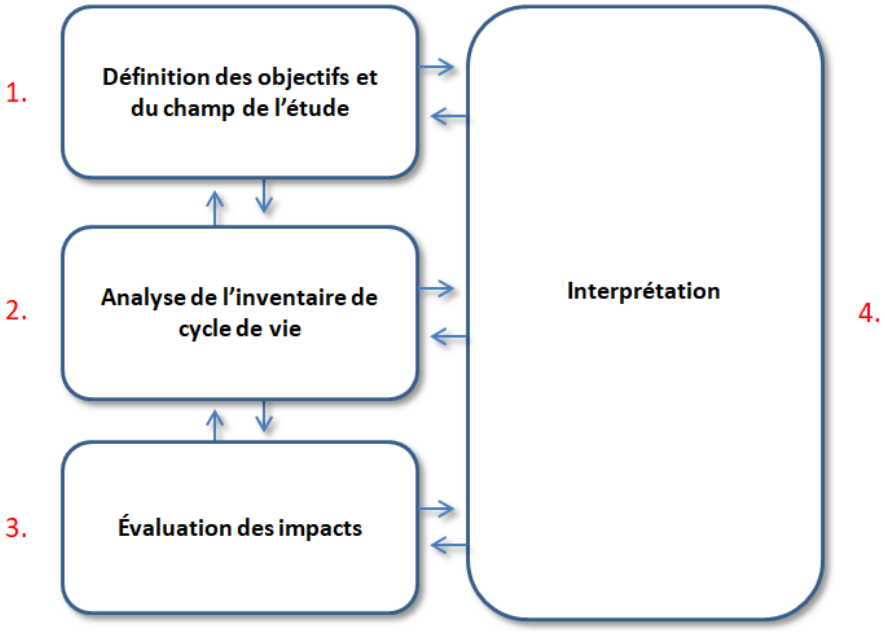


Figure 1.5 – Principales étapes de l'ACV définie selon l'ISO 14040:2006

La démarche de l'ACV est profondément itérative et évolutive. Les étapes successives de la définition de l'objectif et du champ de l'étude, de l'analyse de l'ICV, de l'évaluation des impacts et de l'interprétation sont réalisées plusieurs fois à mesure que de nouvelles informations deviennent disponibles et que les données s'affinent, jusqu'à atteindre un niveau satisfaisant de qualité de l'inventaire et des résultats (Figure 1.6 – Processus itératif de l'ACV. Figure traduite de *ICLD Handbook – General guide for LCA detailed guidance*). Chacune des étapes est décrite dans la suite.

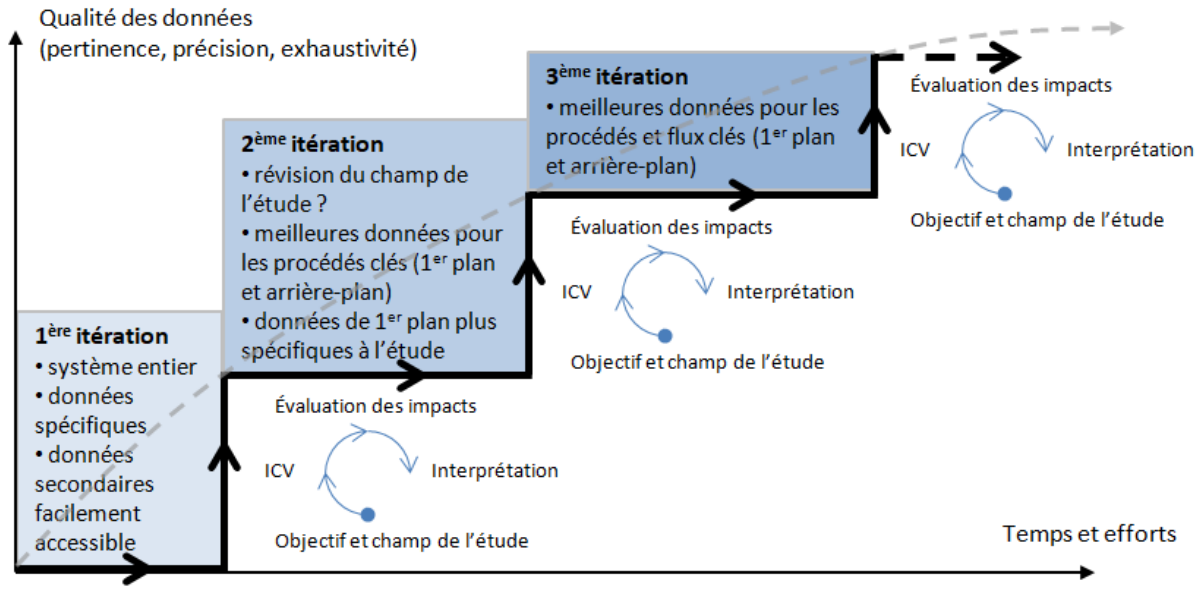


Figure 1.6 – Processus itératif de l'ACV. Figure traduite de *ICLD Handbook – General guide for LCA detailed guidance* (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010)

1.3.1.1 Étape 1 : la définition de l'objectif et du champ de l'étude

Une définition claire et transparente des objectifs et du champ de l'étude évite l'interprétation erronée ou biaisée des résultats et facilite la reproductibilité et la comparaison de l'étude par des pairs. La définition de l'objectif se caractérise notamment par six points :

- **Les applications de l'étude.** Une ACV peut être menée par exemple pour de l'écoconception, la comparaison de produits ou services, la labellisation, la certification ou l'évaluation d'une empreinte carbone.
- **Les limites de l'étude.** Elles peuvent être : le nombre d'indicateurs d'impacts retenus, certaines limites méthodologiques (étude plus ou moins détaillée) ou des limites géographiques et temporelles.
- **Les raisons et les motivations de l'étude**. Il s'agit de décrire le contexte décisionnel qui entoure l'étude et la nature des décisions qui pourraient être prises suivant les résultats de l'ACV.
- **Le public visé en priorité par les résultats de l'étude.** Il peut être interne, externe ou public, puis technique ou non technique.
- **Le commanditaire de l'étude.** Il doit être précisé ainsi que tous les autres acteurs qui peuvent avoir de l'influence comme des co-financeurs et des experts en ACV impliqués dans l'étude.

Une fois les objectifs fixés, le champ de l'étude est défini en accord avec les raisons de l'étude, le contexte décisionnel, les applications et les destinataires des résultats. Le champ de l'étude décrit en détail la méthodologie adoptée, la façon dont les résultats seront présentés et leur qualité. Le champ de l'étude est décrit à partir des points clés suivants :

- le système d'étude, ses fonctions, son unité fonctionnelle et flux de références ;
- la méthodologie adoptée dans la modélisation de l'ICV notamment en ce qui concerne les coproduits et aspects multifonctionnels de certains procédés et produits ;
- les frontières du système ;
- le choix des catégories d'impact considérées et des méthodes de caractérisation qui leurs sont associées ;
- les types, les sources des données utilisées dans l'ICV et leur qualité en termes de représentativité et pertinence technologiques, géographiques et temporelles.

Fonction(s) du système et unité fonctionnelle

Le système d'étude est décrit par les fonctions qu'il réalise, agrégées en une unité fonctionnelle. Cette notion est centrale en ACV car elle permet la comparabilité entre

produits et services. L'analyse fonctionnelle du système permet de déterminer la ou les fonctions qui composent l'objet d'étude. L'unité fonctionnelle (UF) nomme et quantifie les aspects quantitatifs et qualitatifs de cette ou ces fonctions. Elle doit pouvoir répondre aux questions « quoi ? », « combien ? », « comment ?» et pour « pour combien de temps ? ». À cette UF est associé un flux de référence, ou plusieurs flux de référence s'il l'objet d'étude est multifonctionnel. Un flux de référence exprime une relation directe avec l'UF ou une quantité de ce produit. La comparaison entre produits est possible uniquement selon des unités fonctionnelles équivalentes, autrement cette comparaison pourrait mener à des erreurs. Dans le cas d'une comparaison de différents matériaux, ils doivent être associés à un même contexte d'usage. Par exemple, le plastique PET et le verre peuvent être comparés dans le cas d'« une bouteille en plastique PET de 1 l. » et d'« une bouteille en verre de 1 l. ». Si la comparaison concerne un même type de matériau ou un même produit, l'objectif peut être de comparer différents procédés de production, par exemple « 1 baril de diesel produit de manière chimique classique » et « 1 baril de biodiesel produit avec des résidus agricoles » (à performances égales à l'utilisation).

Modélisation de l'ICV

Les choix de modélisation de l'ICV doivent être énoncés lors de la définition du champ de l'étude et vont dépendre des objectifs de l'étude : l'approche attributionnelle et l'approche conséquentielle, l'allocation ou l'extension du système pour les produits multifonctionnels.

L'approche attributionnelle est la plus utilisée en ACV pour des raisons historiques et de praticité. Un modèle de cycle de vie attributionnel décrit le système d'étude dans une technosphère (l'ensemble des activités humaines, des procédés et des produits) statique et décrite par des données qui reflètent le panel moyen de procédés ou de technologies disponibles. L'approche conséquentielle se positionne en amont d'une décision et cherche à identifier les conséquences et les changements marginaux qu'une décision engendre sur les activités et procédés de la technosphère. Ces changements sont liés à des interactions économiques, politiques et/ou comportementales entre le système de premier plan (par exemple le bâtiment étudié) et les systèmes d'arrière-plan avec lesquels il interagit (par exemple le bâtiment étudié interagit avec le système électrique). Les procédés marginaux

peuvent, entre autres, être liés à un changement de demande sur un produit ou service qui va causer l'activation de certains moyens de production, la construction d'une nouvelle usine ou au contraire le démantèlement d'une existante ; ou bien des changements de modes de consommation comme des effets rebond. Une des manières de modéliser ces changements marginaux est de coupler les données d'inventaire avec des modèles économiques d'équilibre généraux ou partiels de secteurs clés. Le choix entre approche attributionnelle et conséquentielle dépend principalement des objectifs de l'étude. Si l'ACV a pour but d'aider une décision, l'approche conséquentielle est la plus adaptée. Dans le cas d'une évaluation *a posteriori* d'un produit existant ou d'une certification, une approche attributionnelle est plus adaptée. En pratique, l'approche attributionnelle est la plus couramment utilisée de par sa facilité d'accès et son développement historique.

Les hypothèses de modélisation des procédés et produits multifonctionnels dans l'ICV font partie du champ de l'étude. Un produit ou procédé est multifonctionnel s'il délivre plus d'une fonction ou plusieurs coproduits. C'est par exemple le cas d'un incinérateur de déchet qui va éliminer des déchets, produire de la chaleur et l'électricité, ou un téléphone portable qui pourra remplir plusieurs fonctions. Il est courant de ne considérer qu'un ou une partie des fonctions ou coproduits d'un procédé multifonctionnel. Plusieurs méthodes permettent de prendre en compte ce caractère multifonctionnel dans l'ICV. Ces méthodes dépendent de l'objectif de l'étude, des données et informations disponibles, et des caractéristiques du produit ou procédé multifonctionnel. La norme ISO 14044 :2006 présente ces méthodes par ordre de priorité. La première méthode est la subdivision qui consiste à isoler directement une sous-fonction d'un procédé en collectant les données d'émissions et de ressources qui y sont directement liées. Lorsque la subdivision n'est pas possible à appliquer, la deuxième méthode est l'élargissement des frontières du système. Elle peut être appliquée de deux manières : en ajoutant des fonctions supplémentaires ou en appliquant de la substitution pour soustraire des fonctions qui sont inutiles à l'objet d'étude. Par exemple, le recyclage en fin de vie d'une cannette permet de produire de l'aluminium recyclé, mais la production d'aluminium ne fait pas partie de l'unité fonctionnelle généralement définie pour une cannette (« contenir 33 cl de boisson »). Ce coproduit de fin de vie de la cannette peut donc être soustrait du système en substituant une production primaire d'aluminium équivalente. Un impact est évité par le recyclage en fin

de vie ce qui apporte un bénéfice au cycle de vie de la cannette s'il est réalisé. Enfin, lorsque l'extension des frontières du système n'est pas possible, il est possible de procéder à une allocation qui va distribuer les entrées et sorties du procédé aux différentes co-fonctions selon des critères d'allocation tels que la masse, le contenu énergétique, le coût, etc. En pratique il peut être difficile d'appliquer un critère d'allocation physique et une allocation économique est le plus souvent utilisée.

Frontières du système

Les frontières du système délimitent l'ensemble des procédés qui sont impliqués dans l'unité fonctionnelle et participent aux impacts environnementaux. Elles séparent le système d'étude du reste de la technosphère et de l'écosphère (l'environnement naturel). Les procédés qui font partie du système d'étude sont généralement classés entre ceux qui appartiennent au système de premier-plan et ceux qui appartiennent au système d'arrière-plan. Le système de premier-plan correspond aux procédés qui devraient être représentés par des données ou modèles spécifiques au système d'étude. Le système d'arrière-plan est généralement représenté par des données moyennes ou génériques et comprends les procédés sur lesquels ne peuvent pas agir les décideurs de l'étude. Théoriquement, toutes les activités de la technosphère peuvent être impliquées dans un produit ou une décision, mais seulement les plus pertinentes, celles qui contribuent significativement aux impacts du produit, sont retenues au sein des systèmes de premier plan et d'arrière-plan. Les procédés qui sont jugés négligeables sont séparés du système par la frontière, ils sont « *cut-off »* en anglais.

Le choix des frontières du système va dépendre de l'approche de modélisation choisie : dans une approche attributionnelle les procédés inclus dans les frontières sont ceux qui participent directement au système d'étude, alors que dans une approche conséquentielle les frontières doivent être élargies pour permettre la modélisation d'interactions plus complexes. La Figure 1.7 qui délimite les flux avec la technosphère et la biosphère qui sont inclus et exclus des frontières du système. Les procédés de fin de vie se situent dans la partie aval du système d'arrière-plan.

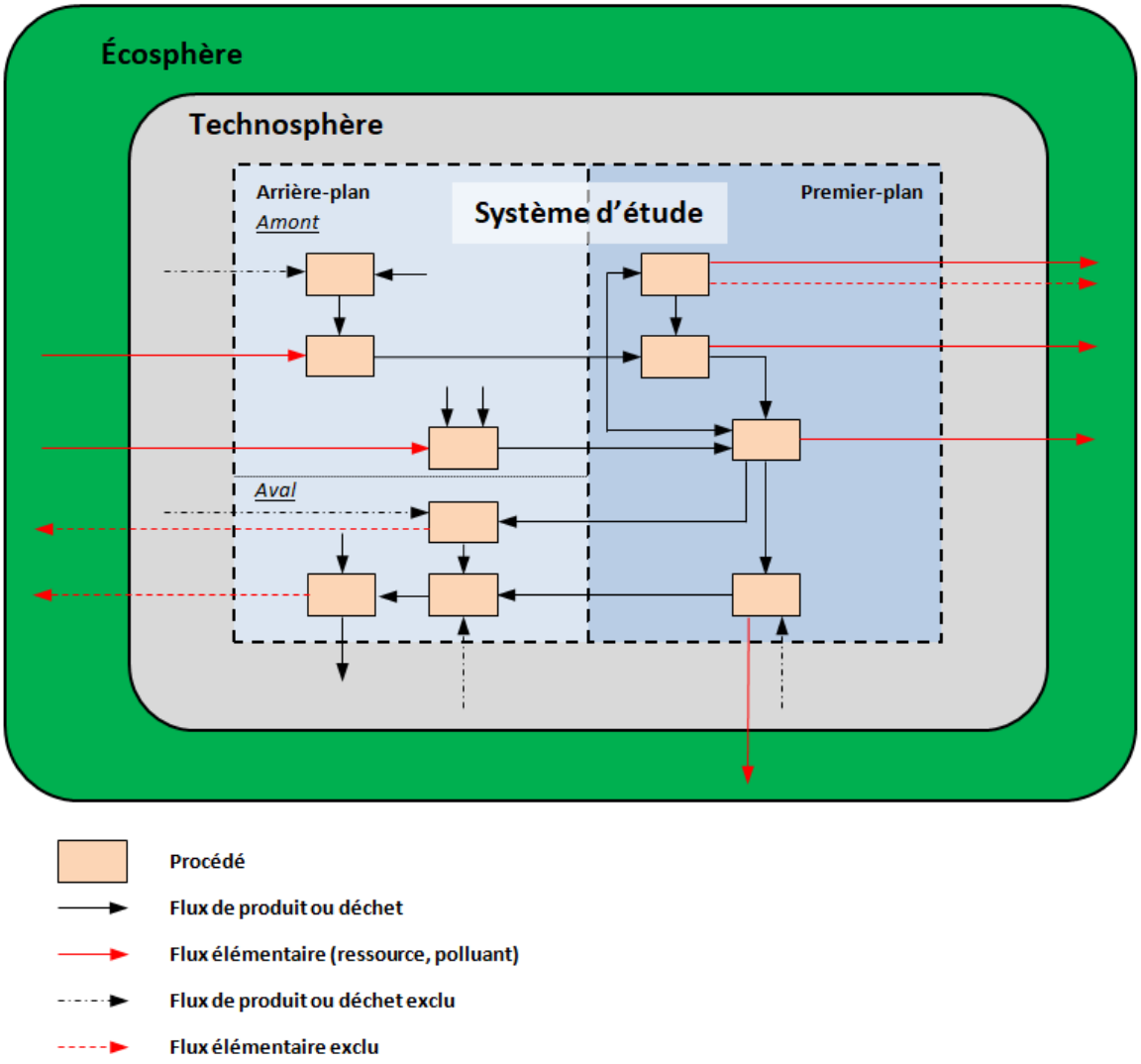


Figure 1.7 – Schéma illustratif des frontières d'un système d'étude

Choix des catégories d'impact et des méthodes de caractérisation

Il est préférable de déterminer dans le champ de l'étude les différentes catégories d'impact qui seront calculées dans l'étape 3, ainsi que les éventuelles méthodes de normalisation et de pondération des résultats, en fonction des objectifs fixés. La sélection de ces catégories d'impact dès l'étape 1 permet de garantir un choix non biaisé par les résultats initiaux de l'étude et d'assurer la construction d'un ICV cohérent.

Qualité des données

Les données utilisées doivent être suffisamment représentatives des produits/procédés existant dans la réalité, et ces produits/procédés doivent être les plus appropriés au regard du système d'étude. La représentativité d'un procédé est définie par une représentativité technologique, géographique et temporelle. Un procédé est approprié s'il est bien celui qui correspond au système d'étude réel. Ces trois aspects caractérisent ensemble la représentativité de l'ICV du système d'étude (voir 1.5.1.1 sur les incertitudes en ACV). L'ICV doit par ailleurs inclure les flux élémentaires nécessaires à l'évaluation des indicateurs d'impact fixés dans les objectifs : il en faut davantage pour évaluer les impacts sur la santé et la biodiversité que pour un simple bilan carbone.

1.3.1.2 Étape 2 : analyse de l'inventaire de cycle de vie (ICV)

L'étape de l'inventaire de cycle de vie commence par l'identification de tous les procédés qui sont inclus dans les frontières de l'étude définies dans l'étape précédente. Les données d'inventaire de tous les procédés sont ensuite collectées dans les quantités qui correspondent à l'unité fonctionnelle. Ces inventaires sont composés de différents types de flux entrants et sortants :

- Les flux élémentaires : ce sont les ressources naturelles et les émissions de substances échangées avec l'écosphère. Les émissions sont classées par compartiment (sol, air, eau douce, océan). Les ressources inclus aussi la transformation et l'usage des sols.
- Les flux de produits : ce sont les produits et les services qui entrent et sortent des procédés. Ces flux relient plusieurs procédés entre eux pour former la chaîne de production. Ils peuvent être des produits chimiques, des vecteurs énergétiques, des composants, des produits complexes et des services de toutes sortes.
- Les flux de déchets : ce sont les flux de déchets solides, liquides et les eaux usées qui doivent être envoyés vers des procédés de gestion des déchets.

Les données d'inventaire des procédés proviennent généralement de bases de données dont la qualité dépend des quantités de données disponibles, de leur fiabilité et de leur représentativité (géographique, technologique et temporelles). Pour les procédés de premier-plan, des données peuvent être collectées à partir de sources plus spécifiques à

l'étude : des mesures, des factures, des questionnaires. La modélisation permet en particulier d'obtenir des données d'inventaire spécifiques au système de premier-plan et aux procédés marginaux dans une approche conséquentielle.

D'autres types d'information peuvent aussi être collectés durant cette étape comme des données statistiques sur le marché d'approvisionnement, des caractéristiques techniques et technologiques de procédés, et toute autre information qui ne concerne pas directement l'évaluation des impacts environnementaux. Tout au long de cette étape, le praticien peut découvrir de nouvelles données ou des informations qui l'amèneront à réajuster le champ de l'étude. À l'issue de cette étape les flux élémentaires de l'ICV sont agrégés sur le cycle de vie complet du système, sur des étapes du cycle de vie, des sous-parties du système ou des périodes temporelles dans le cas d'une ACV dynamique. Le résultat final doit être un ICV qui contient exclusivement des flux élémentaires qui correspondent à l'unité fonctionnelle du système d'étude, à l'exception de certains flux de déchets qui peuvent être évalués séparément.

1.3.1.3 Étape 3 : évaluation des impacts environnementaux

Dans cette étape, les flux élémentaires de l'ICV rassemblés dans l'étape précédente sont traduits en impacts selon différentes catégories. Cette étape est constituée des activités suivantes :

- La classification et la caractérisation de chaque flux élémentaire en impacts environnementaux grâce à des facteurs de caractérisation.
- Optionnellement, la normalisation des résultats en les multipliant par un facteur de référence comme la moyenne nationale, un citoyen moyen ou des méthodes de monétarisation afin d'obtenir des résultats d'impacts sans unité.
- Optionnellement, suite à la normalisation, la pondération des résultats d'impacts par des facteurs de pondération qui décrivent l'importance donnée par les décideurs à chaque catégorie d'impact.

1.3.1.4 Étape 4 : interprétation des résultats

La phase d'interprétation a deux objectifs différents. Premièrement, elle sert à identifier des points d'amélioration dans l'analyse d'inventaire afin d'ajuster l'étude dans

les itérations suivantes. Enfin, lorsque que l'étude est suffisamment mature, elle sert à analyser les résultats (analyse de contribution, analyse de sensibilité, analyse d'incertitude, analyse comparative) afin d'en tirer des conclusions et des recommandations robustes.

1.3.2 Méthodes en ACV de bâtiment

L'ACV a été appliquée dans le secteur du bâtiment depuis plus de 20 ans selon différents contextes et objectifs (Polster et al., 1996 ; Buyle et al., 2013) :

- l'aide à la décision en conception ou rénovation ;
- l'évaluation environnementale de bâtiments résidentiels et non résidentiels ;
- l'aide à la décision à l'échelle du quartier ;
- l'évaluation environnementale de matériaux et de composants de construction ;
- l'évaluation environnementale d'étapes spécifiques du cycle de vie de bâtiment, comme la construction ou la fin de vie, ou du cycle de vie entier ;
- l'évaluation environnementale de systèmes et de procédés de construction ;
- le développement d'outils et bases de données ACV spécifiques au secteur de la construction ;
- des développements méthodologiques spécifiques au bâtiment, par exemple en ACV dynamique, en ACV conséquentielle ou dans l'analyse des incertitudes.

Le bâtiment a des caractéristiques propres et sensiblement différentes d'autres produits industriels traditionnellement analysés en ACV. C'est un système complexe avec une durée de vie longue pouvant aller au-delà de 100 ans. L'approche holistique et systémique de l'ACV est donc particulièrement adaptée à l'évaluation environnementale de ce type de système qui mobilise une grande diversité de filières, de composants, d'activités et d'émissions environnementales disséminées partout dans le monde. En revanche, des développements sont toujours nécessaires pour évaluer de manière fiable le bâtiment malgré un ensemble de spécificités liées à son caractère complexe : des aspects dynamiques de court et long terme, de nombreuses interactions avec d'autres systèmes et décisions humaines, et une longue durée de vie. Cette section s'intéresse aux travaux de la littérature en lien avec ces problématiques. Les questions des incertitudes, fortement liées à ces notions, sont traitées plus particulièrement en section 1.6.

1.3.2.1 Étapes du cycle de vie d'un bâtiment

L'application principale de l'ACV au cœur de cette thèse est l'évaluation environnementale d'un bâtiment zéro-énergie sur tout son cycle de vie dans un but d'écoconception. L'approche complète du bâtiment et de son cycle de vie permet d'éviter le déplacement d'impacts vers des composants ou vers certaines étapes. L'application de l'ACV au bâtiment est standardisée par la norme CSN EN 15978:2011 du Comité Européen de Normalisation (Comité Européen de Normalisation, 2011). Elle décrit le système et le cycle de vie du bâtiment en plusieurs étapes et sous-étapes (les modules) illustrée à la Figure 1.8, de l'extraction des ressources utiles à la construction jusqu'à la fin de vie du bâtiment.

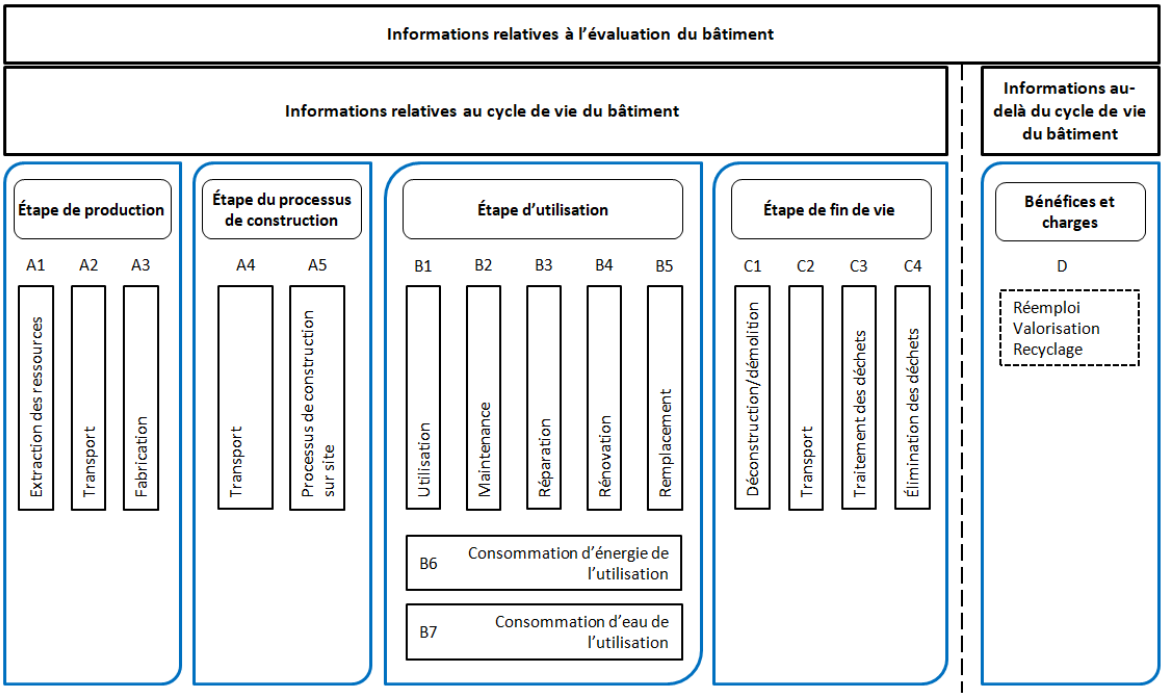


Figure 1.8 – Étapes et modules du cycle de vie d'un bâtiment selon la norme CSN EN 15978:2011

Ces modules peuvent être réorganisés en quatre étapes du cycle de vie du bâtiment :

- **Étape de construction.** Comprend les modules A1 à A5 : extraction des ressources, transport des ressources jusqu'aux usines, fabrication des composants, transport des

composants jusqu'au site de construction et activités de chantier (dont les éventuelles pertes de matériaux).

- **Étape d'utilisation.** Comprend les modules B1, B6 et B7 qui concernent l'utilisation des occupants : la consommation d'énergie et d'eau, la production de déchets, et éventuellement l'usage de transports.
- **Étape de rénovation.** Comprend les modules B2 à B5 : la maintenance, la réparation, le remplacement et la rénovation des composants du bâtiment.
- **Étape de déconstruction.** Comprend les modules C1 à C4 et D : le démantèlement du bâtiment, le transport des déchets puis leur traitement final (décharge, incinération, recyclage, réemploi). Dans cette étape sont considérées les hypothèses de substitution et d'allocation des procédés de fin de vie comme l'impact évité par le recyclage d'un matériau ou le réemploi.

La littérature en ACV de bâtiment montre que les impacts environnementaux des constructions qui composent la majorité du parc bâti sont principalement liés aux consommations énergétiques de l'étape d'utilisation. Cette étape contribue pour 60 à 90 % à la consommation d'énergie primaire et à l'émission de GES du cycle de vie global (Peuportier, 2008 ; Cabeza et al., 2014 ; Buyle et al., 2013). Historiquement, les efforts d'amélioration environnementale du bâtiment se sont concentrés sur la réduction des consommations d'énergie et plus spécifiquement des besoins de chauffage et de refroidissement (Fouquet et al., 2015). Des bâtiments passifs et à basse consommation ont été développés avec une meilleure isolation de l'enveloppe (parois, portes et fenêtres), une meilleure étanchéité à l'air et l'installation d'une ventilation avec échangeur de type double flux. On observe pour ces bâtiments très performants d'un point de vue énergétique une réduction globale des impacts avec une contribution relative plus élevée des étapes de construction, de rénovation et de fin de vie (Saade et al., 2019). Blengini et Di Carlo (2010) analysent une maison passive et la comparent à une maison standard en Italie : ils observent que malgré une division des besoins de chauffage par 10, la consommation d'énergie primaire et l'émission de GES sur le cycle de vie sont seulement divisées d'un facteur 2. Le déplacement des impacts vers d'autres étapes que l'utilisation encourage les futurs développements en ACV de bâtiment vers l'évaluation plus précise des procédés de

construction et de fin de vie, comme le recyclage et la réutilisation (Vieira et Horvath, 2008), et de la durée de vie du bâtiment (Marsh, 2017). La définition généralement admise de l'optimalité environnementale d'un bâtiment se déplace, passant d'une notion unique de réduction de la consommation énergétique vers l'identification d'un équilibre optimal entre minimisation des impacts « gris » et minimisation des impacts directs durant l'utilisation (Buyle et al., 2013).

1.3.2.2 Inventaire de cycle dynamique intra-annuel en approche attributionnelle

La demande énergétique d'un bâtiment présente une forte variabilité temporelle liée à la fluctuation des besoins des occupants (température de confort, usages d'ECS et d'appareils électriques) et de la météorologie. La variabilité et la contribution significative de la consommation d'énergie dans les impacts du cycle de vie ont encouragé l'usage de modèles de simulation énergétique du bâtiment (SED) pour fournir à l'inventaire de cycle de vie des données de consommation d'énergie du bâtiment dynamiques et réalistes (Peuportier, 2008 ; Peuportier et al., 2013). Ces modèles de SED calculent les besoins thermiques et les consommations d'un bâtiment avec une résolution horaire à partir de ses caractéristiques thermiques (enveloppe et systèmes), du site (course du Soleil, masques proches et lointains), de scénarios d'usage des occupants (température de consigne, électricité spécifique, eau chaude sanitaire, présence, etc.) et de données climatiques de référence (Peuportier et Blanc-Sommereux, 1990). Toujours dans la phase d'ICV, le mix d'approvisionnement électrique peut être décrit par des données dynamiques pour prendre en compte ses variabilité saisonnières (p. ex. la pointe hivernale), hebdomadaires (p.ex. différence entre jours ouvrés et week-end) et journalières (p. ex. la pointe en soirée et les heures creuses durant la nuit) dans l'évaluation des impacts de la consommation d'électricité (Roux et al., 2017). Durant les heures de pointes, les technologies d'approvisionnement les plus flexibles (mais aussi les plus chères à activer et les plus polluantes comme les centrales à combustion à gaz, charbon ou fioul) ainsi que les imports sont mis en fonctionnement, augmentant considérablement l'impact environnemental d'un kWh d'électricité consommé sur le réseau (Rehberger et Hiete, 2015). Dans la littérature en ACV de bâtiment la description annuelle du mix d'approvisionnement électrique est la plus souvent adoptée. Pourtant, plusieurs travaux montrent que l'usage d'un ICV

dynamique de l'électricité en ACV de bâtiment améliore de façon non négligeable la qualité de l'évaluation environnementale de l'étape d'utilisation d'un bâtiment. Cet ICV dynamique intra-annuel est illustré à la Figure 1.9.

Roux et al. (2016) trouvent qu'une description annuelle du mix électrique plutôt qu'une description horaire peut mener à une sous-estimation de 40 % de l'émission de GES du bilan électrique annuel (consommation + production) d'un bâtiment en France équipé de panneaux photovoltaïques (PV) et de convecteurs électriques. Asdrubali et al. (2019) réalisent la même comparaison mais sur l'émission de GES totale (sur cycle de vie) et observent une sous estimation de 8 % avec la description annuelle du mix dans le cas d'une maison à énergie positive située en Italie. Beloin-Saint-Pierre et al. (2019) observent une sous-estimation moyenne de 14 % de l'émission de GES de la consommation d'électricité annuelle, en comparant une description annuelle du mix et des descriptions mensuelle, journalière et horaire, dans le cas d'un bâtiment équipé de panneaux PV en Suisse. Collinge et al. (2018) réalisent la même comparaison dans le cas d'un bâtiment basse consommation (sans production PV) et d'un BZE. Les résultats diffèrent des études citées précédemment avec une surestimation de 30 % de l'émission de GES de la consommation énergétique en utilisant un mix annuel plutôt qu'un mix horaire dans le cas du bâtiment basse consommation, et aucune différence significative sur ce même indicateur dans le cas du BZE. Néanmoins, ils montrent des différences notables sur d'autres indicateurs (eutrophisation, ozone photochimique, effets respiratoires), des résultats fortement liés aux spécificités du cas d'étude dont un mix de production électrique qui présente une pointe hivernale et une pointe estivale. Plus généralement, l'usage d'une description mensuelle du mix électrique peut déjà améliorer significativement la qualité de l'évaluation environnementale. Une description horaire du mix électrique reste toutefois la plus recommandée malgré la hausse de complexité que peut amener son implémentation.

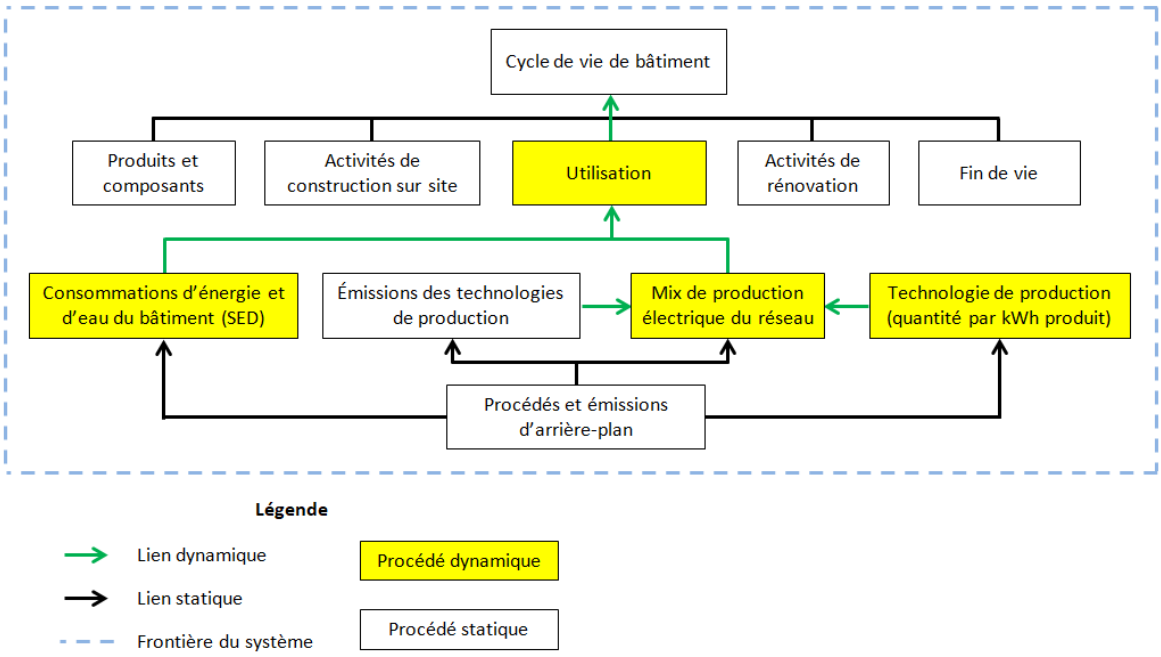


Figure 1.9 – ICV dynamique intra-annuelle des consommations d'électricité et du mix. Dans un exemple d'ICV inter-annuelle, les « émissions des technologies de production » seraient dynamiques pour décrire des évolutions technologiques (Su et al., 2019)

1.3.2.3 Export d'électricité sur le réseau et approche conséquentielle

La création d'un ICV dynamique est d'autant plus recommandée pour l'évaluation environnementale de BZE et de BEPOS. Ces types de bâtiments sont équipés de système de production renouvelable, le plus souvent des panneaux solaires PV. Ils vont produire de l'électricité, l'autoconsommer et exporter le surplus de production qui sera utilisé ailleurs sur le réseau. Le BZE/BEPOS, en tant que système, acquiert ainsi une nouvelle fonction « de production d'électricité sur le réseau ». La façon dont est prise en compte, ou non, cette nouvelle fonction peut avoir une grande influence sur les résultats de l'ACV. Si cette fonction est coupée du système (*cut-off*) aucun bénéfice n'est accordé à l'export. Dans le cas où l'on procède à une expansion des frontières du système pour intégrer cette fonction (voir la section 1.3.1.1 et la modélisation de l'ICV), l'export d'électricité du bâtiment va se substituer à une production équivalente sur le réseau et des bénéfices environnementaux peuvent être attribués. Beloin-Saint-Pierre et al. (2019) excluent l'export des frontières du système et le justifie par l'idée que la gestion de ce surplus appartient au gestionnaire du

réseau électrique. Roux et al. (2016) et Collinge et al. (2018) considèrent des bénéfices environnementaux pour l'export mais ne comparent pas les deux hypothèses. Asdrubali et al. (2019) comparent explicitement les deux hypothèses dans le cas d'une maison à énergie positive équipée d'une PAC électrique et qui possède un bilan final net positif (exportateur) de 7,7 kWh/(m².an). Avec l'hypothèse excluant l'export des frontières du système, l'étape d'utilisation représente 31 % des émissions totales de GES contre -18 % avec l'hypothèse de substitution. L'émission de GES totale du cas excluant l'export est supérieure de 73% au cas incluant l'export. Ils analysent ces hypothèses avec des scénarios de mix électriques futurs décarbonés et montrent que l'émission de GES total du cas sans export diminuerait dans le futur (profitant directement de la décarbonation du mix) tandis qu'il augmenterait dans le cas avec export (les bénéfices de l'export diminuant plus que l'impact de l'import), sans pour autant que leurs courbes ne se croisent.

L'approche conséquentielle est la plus appropriée en ACV pour l'écoconception de BZE car elle contribue à créer un cadre cohérent qui considère à la fois la problématique d'expansion des frontières du système (pour l'export d'électricité PV entre autres), les interactions complexes du bâtiment avec le réseau qui vont mobiliser le mix des technologies de production marginales, et le caractère décisionnel d'un projet de construction de bâtiment (Ekvall et Weidema, 2004 ; Roux et al., 2017 ; W.O. Collinge et al., 2018). Le mix des technologies de production marginal est celui qui est spécifiquement appelé pour répondre à une demande supplémentaire ou qui est démobilisé pour compenser une diminution de la demande. Il est généralement composé des technologies modulables les plus coûteuses à chaque instant, le plus souvent à base d'énergies fossiles ou d'imports. Ainsi Roux et al. (2017) développent un modèle de mix électrique, puis sur un cas d'étude équipé de convecteurs électriques trouvent un mix marginal associé au poste de consommation du chauffage composé annuellement de 87,6 % de production de centrales à gaz et au charbon, 11,7 % de production nucléaire et moins de 1 % d'imports et de technologies de pointes comme les turbines à combustion au fioul. Ce mix marginal attribue une empreinte carbone annuelle de l'électricité pour le chauffage de 839 $kgCO_2$/kWh contre 96 $kgCO_2$/kWh en utilisant un mix attributionnel dynamique soit une multiplication d'un facteur 9. Collinge et al. (2018) justifient l'adoption de l'approche conséquentielle dans l'évaluation d'un BZE en raison de la fluctuation régulière entre sa

production nette (export) et sa consommation nette (parfois plusieurs fois par jour) qui mobiliserait à chaque instant le mix marginal. Dans le cas du bâtiment basse consommation, les auteurs proposent une approche hybride : elle suppose que le gestionnaire de réseau anticipe une consommation d’énergie minimale du bâtiment (sous forme d’un « bandeau ») étant donné qu’il n’exporte jamais sur le réseau. La consommation d’électricité du bâtiment peut ensuite être évaluée avec un mix attributionnel jusqu’au seuil de ce bandeau, seuil au-delà duquel le mix marginal prend le relais. Ils observent qu’avec ces approches, l’étape d’utilisation a une émission de GES 50 % plus élevée pour le bâtiment basse consommation et un bénéfice environnemental (émission de GES négative) 45 % plus élevé pour le BZE qu’avec l’usage d’un mix attributionnel horaire.

1.3.2.4 ACV dynamique long terme

Au-delà des aspects temporels intra-annuels, une approche dynamique en ACV de bâtiment devrait également prendre en compte les évolutions de long terme. Celles-ci sont très influentes en raison de la durée de vie très longue du système et de la forte influence des conditions futures sur l’étape d’utilisation qui peuvent induire des variations d’impacts plus importantes que les impacts des autres étapes (Collinge et al., 2013). Du point de vue des étapes d’une ACV de bâtiment (voir Figure 1.10) les variabilités temporelles intra-annuelles et inter-annuelles concernent (Su et al., 2019) :

- le système de premier-plan, principalement à travers la variabilité de données de consommations d’énergie utilisées pour constituer l’ICV dynamique ;
- les données des procédés qui composent le système d’arrière-plan et sont aussi utilisés pour constituer l’ICV dynamique ;
- les mécanismes d’impact de certaines émissions, qui se traduisent par des facteurs de caractérisation dynamiques, dépendants du moment où un polluant a été émis (étape 3).

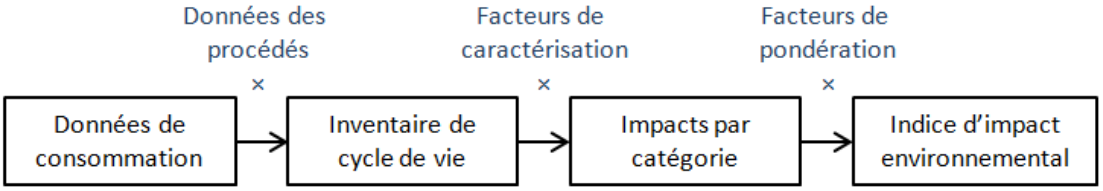


Figure 1.10 – Étapes de l'ACV de bâtiment

Negishi et al. (2018) proposent un cadre méthodologique pour l'ACV dynamique de bâtiment et identifient les aspects dynamiques du cycle de vie d'un bâtiment qui devraient être pris en compte :

- **Le comportement des occupants.** Il peut évoluer avec des changements de typologie des occupants (famille, couple, âges, etc.) et des changements sociétaux qui induisent de nouveaux usages (p.ex. rechargement de batterie de voiture, objets connectés) et de nouveaux comportements plus ou moins vertueux écologiquement (Association négaWatt, 2018). Ces évolutions se répercutent sur les données de consommation du bâtiment *via* les scénarios de confort (températures de consigne), d'usages et de présence utilisés en SED, ainsi que sur les déchets ménagers et l'usage de transport.
- **Les matériaux et composants du bâtiment.** Ils peuvent voir leurs performances thermiques et techniques se dégrader au fil du temps à cause du vieillissement naturel avec par exemple comme conséquence une augmentation de la conductivité thermique des parois qui impacterait les consommations (de Wilde et al., 2011 ; Eleftheriadis et Hamdy, 2018). Ces composants peuvent être remplacés dans le futur par des composants plus performants et/ou produits avec des procédés plus performants qui consomment moins de ressources et émettent moins de polluants. Ces aspects impactent les données de consommation, les données des procédés d'arrière-plan ainsi que les impacts des étapes de rénovation et de fin de vie.
- **Les systèmes CVC, renouvelables et de stockage.** Comme les matériaux et composants, le vieillissement peut impacter les performances techniques (p.ex. le rendement des pompes à chaleur ou des panneaux PV) et ils peuvent être remplacés par des technologies plus performantes dans le futur (Griffith et al., 2008 ; Jordan et Kurtz,

2013 ; Eleftheriadis et Hamdy, 2018). Il est aussi possible que des systèmes supplémentaires de production renouvelable et de stockage soient installés. Ces aspects impactent les données de consommation, les données des procédés d’arrière-plan ainsi que les impacts des étapes de rénovation et de fin de vie.

- **Les mix énergétiques.** Les mix de production énergétique (électricité et chaleur) vont évoluer dans le futur en conséquence de choix politiques et de mécanismes de marché (C. Roux, Schalbart, Assoumou, et al., 2016 ; Raillard, 2019 ; Kiss et al., 2020). Ces évolutions influencent très fortement les impacts de l’étape d’utilisation car ils conditionnent les impacts environnementaux des futures consommations d’énergie.
- **Le stockage et l’émission de carbone.** La capture de carbone durant la croissance de l'arbre, l’absorption de carbone dans les matériaux de construction à base de chaux comme la carbonatation du béton et les émissions de carbone et autres GES en fin de vie des composants vont engendrer des forçages radiatifs qui dépendent du temps (Levasseur et al., 2010 ; Peñaloza et al., 2013 ; Fouquet et al., 2015). Ce phénomène dynamique est illustré à la Figure 1.11 et se traduit en ACV par l’usage de facteurs de caractérisation dépendants du temps dans le calcul des impacts.
- **Les technologies de fin de vie.** Les procédés de fin de vie utilisés pour le remplacement des composants dans l’étape de rénovation et la fin de vie du bâtiment dans l’étape de déconstruction sont incertains. Les technologies de traitement des déchets peuvent évoluer avec l’amélioration des taux de recyclage et des taux de valorisation énergétique. Ces évolutions dépendent de progrès technologiques mais aussi du contexte réglementaire futur et de politiques incitatives ou contraignantes (Meylan et al., 2018).
- **Les conditions météorologiques.** Les évolutions liées au changement climatique (température, rayonnement solaire, taux d’humidité ou précipitations) influencent les consommations d’énergie ainsi que la production d’énergie renouvelable du bâtiment et du mix énergétique (C. Roux, Schalbart, Assoumou, et al., 2016 ; Nik, 2016 ; Ramon et al., 2019 ; Farah et al., 2019).

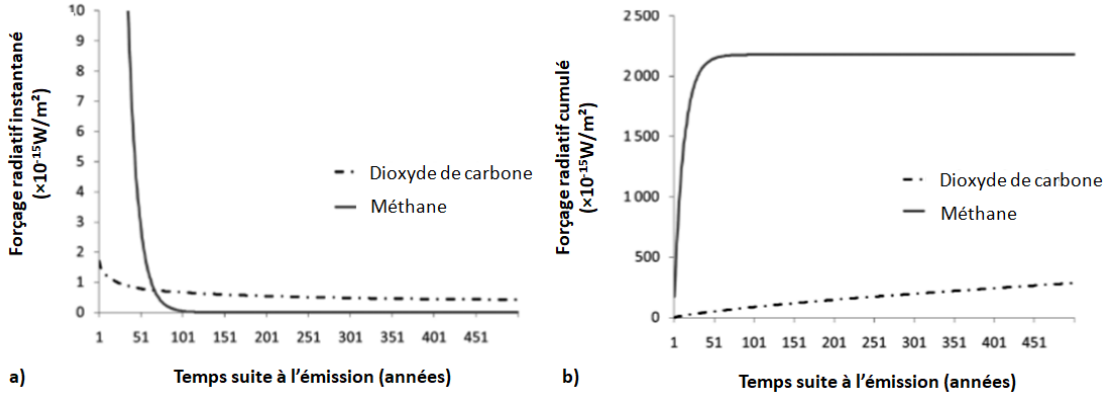


Figure 1.11 – Forçage radiatif instantané (a) et cumulé (b) de l'émission d'une masse unitaire de dioxyde de carbone et de méthane (Levasseur et al., 2010)

L'ACV dynamique d'un bâtiment tend résolument vers une approche prospective de par la longue durée de vie du système d'étude. Par ailleurs, une approche prospective basée sur l'usage de scénario d'évolution inter-annuelle peut profiter d'une approche dynamique de long-terme. La convergence de ces approches est pour le moment un sujet encore récent et en plein développement dans la littérature. Roux et al. (2016) proposent une approche prospective qui divise le cycle de vie du bâtiment en trois périodes de court, moyen et long terme auxquelles sont associées des scénarios climatiques et de mix électrique futurs, indépendants et de résolution horaire. L'approche attributionnelle et l'approche conséquentielle sont chacune adoptées dans l'évaluation de 4 scénarios de cycle de vie d'un bâtiment. En revanche, seul un mix marginal court-terme est utilisé dans l'approche conséquentielle ce qui peut être incohérent avec l'ensemble de l'approche prospective. Les auteurs montrent également l'importance de prendre en compte des scénarios d'évolution du mix électrique et du climat dépendants et cohérents entre eux en raison de leurs interactions à la fois sur la part thermosensible de la demande nationale et sur la productivité des technologies renouvelables, hydrauliques et nucléaires. Su et al. (2019) proposent une approche prospective en ACV dynamique de bâtiment. L'approche est appliquée à un cas d'étude d'une durée de vie de 34 ans en prenant en compte des mix électriques futurs de résolution annuelle et des scénarios sur les futurs taux de recyclage de matériaux à leur fin de vie. Fouquet et al. (2015) réalisent une ACV dynamique en prenant en compte trois scénarios de mix électriques futurs de résolution annuelle et deux scénarios

d'évolution technologiques qui jouent sur les impacts des matériaux de remplacement futurs. Ils obtiennent 6 scénarios de cycle de vie alternatifs qu'ils évaluent pour trois bâtiments d'une durée de vie de 100 ans. Collinge et al. (2013) proposent une méthode pour réaliser une ACV dynamique de bâtiment. L'application qu'ils en font est rétrospective et prospective puisqu'elle analyse un bâtiment déjà construit depuis 1971 et prend en compte des scénarios futurs pour la période 2009-2045. Les aspects futurs comprennent une variation de +10 % et -10 % de la consommation d'énergie du bâtiment, l'évolution du mix électrique, des politiques de réduction des émissions plus ou moins contraignantes et des facteurs de caractérisation dynamique pour l'effet de serre. Ils évaluent une trentaine de cycles de vie dynamiques d'un bâtiment d'université. Negishi et al. (2019) réalisent une ACV dynamique de bâtiment complète prenant en compte un ICV dynamique, des facteurs de caractérisation dynamiques et des indicateurs de changement climatique dynamiques (non agrégés comme le traditionnel indicateur d'effet de serre sur 100 ans *GWP100*). Ils considèrent des scénarios de dégradation annuelle de l'isolation et de systèmes (convecteur électrique et pompe à chaleur), d'évolution des technologies de recyclage, d'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés de fabrication des futurs matériaux, de changement de typologie d'occupants et de mix électrique futur (description annuelle). Ils montrent l'intérêt de l'approche dynamique pour considérer l'aspect temporel de l'impact des émissions de GES qui persiste plusieurs centaines d'années après la fin de vie du bâtiment.

L'approche statique actuellement utilisée en ACV de bâtiment présente des limites de validité temporelle : elle se base sur l'extrapolation d'hypothèses et de données passées sur un cycle de vie de plus de 50 ans, alors que leur validité ne devrait pas excéder 5 ans (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010). L'intégration d'aspects prospectifs en ACV apporte de nouvelles incertitudes. Leur prise en en compte est pourtant nécessaire si l'on veut fournir une évaluation environnementale capable de soutenir une décision de long terme suffisamment fiable. La prise en compte de ces incertitudes, notamment dans le cadre de la prospective, en ACV et dans les thématiques de recherche de l'aide à la décision et de l'efficacité énergétique du bâtiment, est traitée plus en détails dans la section 1.6.

1.3.3 Intégration de l'ACV de bâtiment en phase de conception

1.3.3.1 Outils existants

Il existe de nombreux outils d'ACV des bâtiments. Les plus importants en France sont Equer (implémenté dans Pleiades/ACV) (Polster, 1995), Elodie, Cocon-BIM, e-LICCO. Les logiciels adaptés à l'ACV à l'échelle quartier sont Equer (Popovici, 2005), NEST et Vizcab.

Différentes méthodologies sont intégrées au sein de ces outils. Concernant les allocations d'impacts pour les produits recyclés et l'énergie exportée, on distingue la méthode des stocks et la méthode des impacts évités. Dans la méthode des stocks aucun impact ni bénéfice environnemental n'est affecté au bâtiment qui fournit un produit à recycler et les impacts du recyclage des produits sont affectés au bâtiment qui utilise les produits recyclés. Si un bâtiment exporte de l'énergie aucun impact n'est attribué à la production d'énergie car il ne s'agit pas de la fonction principale du bâtiment. La méthode des impacts évités considère que le recyclage des matériaux évite la fabrication de matériau neuf. Le bénéfice environnemental du recyclage est attribué équitablement entre le bâtiment d'où vient les matériaux recyclés et le bâtiment qui les emploie. Un bâtiment qui exporte de l'énergie aura un bénéfice environnemental car il s'agit d'énergie qu'il n'a pas été nécessaire de produire par ailleurs. Cette dernière méthode est utilisée dans Equer.

La question du carbone biogénique est prise en compte dans Equer. Il s'agit de différencier les impacts du bois de forêts gérées de manière durable, du bois de forêt mal ou non gérées (Peuportier et al., 2013). Dans le cas de bois d'origine durable, un nouvel arbre est replanté et le carbone biogénique absorbé lors de la croissance de cet arbre est pris en compte. Si ce matériau est recyclé ou réutilisé le stockage se perpétue. Si le matériau est incinéré en fin de vie, le carbone biogénique stocké est réémis dans l'atmosphère. Ces émissions peuvent être réduites via l'utilisation d'un récupérateur de chaleur.

Les outils d'ACV s'appuient sur différentes bases de données environnementales, indicateurs environnementaux et méthodes de calculs des indicateurs. Parmi les bases de données existantes, les plus utilisées dans les outils français sont ecoinvent, INIES

(produits de construction), PEP (équipements) et EPD (produits et équipements à l'échelle européenne).

La fiabilité d'Equer et d'autres outils ACV a été étudiée par intercomparaison (Peuportier et al., 2004 ; Salmon et al., 2011).

1.3.3.2 Obstacles à l'utilisation de l'ACV en conception

La pratique actuelle de l'ACV se fait généralement a posteriori pour évaluer une conception ou pour proposer une solution plus performante, elle joue peu de rôle dans les phases amont de conception qui sont pourtant les plus importantes en termes de possibilités architecturales et de performances environnementales. Rejoignant les problématiques évoquées précédemment dans la partie 1.2.1, l'utilisation des outils ACV dans les phases les plus amont de la conception connaît plusieurs obstacles identifiés par Jusselme et al. (2018) :

- La méthode ACV peut s'avérer complexe à mettre en œuvre et nécessite du temps. Les outils actuels sont peu adaptés aux phases de préconception des concours architecturaux où la contrainte de temps est grande.
- En phase amont de conception, le projet est encore peu détaillé et de nombreuses incertitudes planent sur la conception tandis que l'ACV nécessite de nombreuses données détaillées pour fournir des résultats fiables (Figure 1.12). Cette incompatibilité réduit le champ des possibles de l'écoconception et les potentiels d'amélioration des performances environnementales. Deux solutions sont possibles : la première est d'appliquer les outils sur des projets simplifiés, la seconde est d'évaluer dès la phase amont un projet détaillé mais qui contient de fortes incertitudes sur les hypothèses. Néanmoins, les résultats générés sont peu fiables. Des outils ACV simplifiés qui écartent des étapes et des aspects de l'étude peuvent également être appliqués (Malmqvist et al., 2011). Leurs résultats peuvent sous-évaluer les impacts de 10 % à 83 % par rapport à une ACV complète suivant le degré de simplification appliqué (Lewandowska et al., 2015).
- Les résultats d'ACV sont souvent non-reproductibles car, d'une étude à l'autre, les frontières du système, l'unité fonctionnelle, les bases de données utilisées peuvent

changer. Des concepteurs ayant peu d'expérience en ACV peuvent trouver les résultats arbitraires et peu précis.

Peuportier et al. (2013) considèrent qu'une évaluation détaillée peut être réalisée durant les phases amont de conception grâce à l'utilisation de données génériques pour simplifier et accélérer la saisie de l'étude ACV. Ces hypothèses par défaut concernent les fiches d'impacts moyens associées aux matériaux, les distances de transport des matériaux de construction jusqu'au site, les procédés de fin de vie. Des hypothèses plus précises et adaptées au projet peuvent ensuite utilisées lorsque plus d'informations apparaissent quant aux fournisseurs.

Afin de faciliter la saisie en phase amont tout en conservant un certain degré de fiabilité, il convient de concentrer les efforts de modélisation sur les facteurs incertains les plus influents au regard des critères choisis par les décideurs. Parmi les facteurs influents identifiés par Pannier (2017) sur les émissions de CO2-équivalent, les hypothèses liées à l'occupation (nombre d'occupants, consignes de température, apports internes) peuvent être générées de manière fiable et simplifiée grâce à un modèle stochastique d'occupation (Vorger, 2014). De la même manière, l'utilisation d'un modèle de mix électrique dynamique (Roux, 2016) réduit les besoins de saisie de l'utilisateur tout en augmentant la précision de l'évaluation environnementale. D'autres facteurs influents identifiés sont : la durée de vie du bâtiment et de ses composants, le rendement du réseau d'eau, les températures extérieures, les données environnementales utilisées. Informer les décideurs sur les paramètres influents est primordial pour assurer une bonne répartition des efforts de conception dans la recherche d'information et de détail. La mise en place de références (bâtiments, hypothèses…) est également une nécessité pour guider les concepteurs.

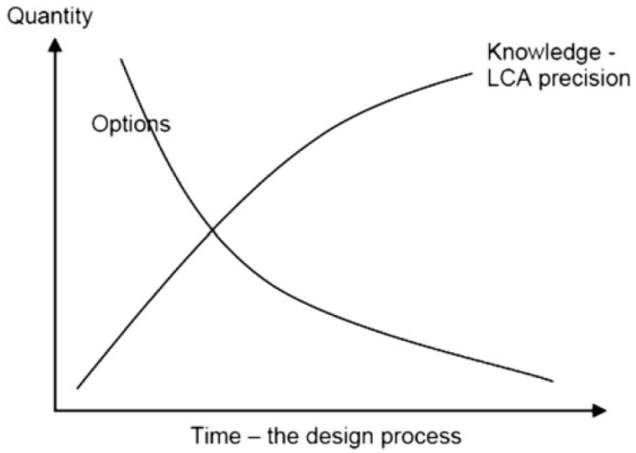


Figure 1.12 - Relation entre la quantité d'options de conception et la quantité de d'informations disponibles durant la phase de conception (Malmqvist et al. 2011)

1.3.3.3 Importance de l'ACV en écoconception

Malgré les difficultés entourant sa mise en œuvre, l'ACV est un outil indispensable en écoconception. Pour orienter les décideurs vers les choix de conception les plus pertinents, l'ACV doit être contextualisée pour correspondre le plus possible à la réalité locale dans laquelle le bâtiment devra s'inscrire. Ainsi Ortiz-Rodríguez et al. (2010) réalisent les ACV contextualisées de maisons situées en Espagne et en Colombie. La comparaison entre les deux pays fait apparaître de fortes différences dans les impacts et leur répartition dans le cycle de vie, par exemple la phase d'utilisation est la plus impactante en Espagne ; à l'inverse la phase de construction est la plus impactante en Colombie. La contextualisation est essentielle en conception pour identifier les stratégies d'optimisation les plus adaptées à un projet.

Stephan et al. (2013) montrent qu'un bâtiment passif situé en zone périurbaine peut être plus impactant qu'un logement en appartement en centre-ville à cause du transport des occupants. De plus, quand l'unité fonctionnelle est exprimée en impacts par m², il est plus facile de répondre aux exigences de consommation d'énergie primaire par m² du label maison passive avec un bâtiment de grande taille car, à occupation égale, les besoins de consommation sont répartis sur une plus grande surface ; par ailleurs l'énergie grise devient un contributeur important des impacts. Ces résultats montrent l'importance de

l'ACV mais aussi de la bonne définition de son cadre d'étude et de son unité fonctionnelle pour une évaluation environnementale fiable des bâtiments. Plus généralement, la bonne pratique de l'ACV permet d'éviter le problème de déplacement des impacts qui peut arriver lorsque une optimisation de la conception se concentre principalement sur un contributeur (p. ex. la performance énergétique) ou un indicateur (p. ex. l'émission de GES) en particulier (Soares et al., 2017). Cette problématique peut être rencontrée avec la généralisation des futurs bâtiments zéro-énergie et BEPOS. Le couplage de l'ACV avec des outils d'optimisation multicritère peut permettre de répondre efficacement à cette problématique.

1.4 L'optimisation multicritère de bâtiment

La prise de décision en écoconception de bâtiment est une forme d'optimisation qui cherche à minimiser des impacts environnementaux, des coûts, ou à maximiser des indicateurs de performances tout en respectant un ensemble de contraintes, par exemple réglementaires. Cette prise de décision peut s'apparenter à de l'optimisation multicritère avec des objectifs parfois contradictoires à satisfaire. Cette section commence par la définition de l'optimisation multicritère et de ses notions puis se poursuit par ses applications en efficacité énergétique et écoconception de bâtiment.

1.4.1 Notions en optimisation multicritère

1.4.1.1 Définition du problème d'optimisation multicritère

Un problème d'optimisation multicritère consiste en plusieurs fonctions objectif, parfois contradictoires, à minimiser (ou maximiser), et des contraintes d'égalité ou d'inégalité à respecter :

$$\begin{aligned} &\text{Minimiser} && f_m(x), && m = 1,2,\dots,M; \\ &\text{sous la contrainte de} && g_j(\boldsymbol{x}) \geq 0, && j = 1,2,\dots,J; \\ & && h_k(\boldsymbol{x}) = 0, && k = 1,2,\dots,K; \\ & && x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)} && i = 1,2,\dots,n; \end{aligned} \qquad \textbf{(1.1)}$$

avec :

f_m : fonction objectif m à optimiser ;

M : nombre de fonctions objectif, $M \geq 2$;

g_j : contrainte d'inégalité j à respecter ;

J : nombre de contraintes d'inégalité à respecter, $J \geq 0$;

h_k : contrainte d'égalité k à respecter ;

K : nombre de contraintes d'égalité à respecter, $K \geq 0$;

Une solution $\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{\mathcal{R}^n}$ est un vecteur composé de n variables de décision (aussi appelé paramètres d'optimisation) : $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$. Les solutions qui satisfont les contraintes et les bornes des variables ${x_i}^{(L)}$ et ${x_i}^{(U)}$constituent l'ensemble valide S dans l'espace des variables de décision $\boldsymbol{\mathcal{R}^n}$. Pour chaque solution $\boldsymbol{x}$ de S, il existe un point $\boldsymbol{z} \in Z$, tel que $\boldsymbol{F(x)} = \boldsymbol{z} = (z_1, z_2, \dots, z_M)^T$ (Deb, 2015). L'ensemble Z forme l'espace des objectifs directement relié à l'espace de décision S par les fonctions objectif (Figure 1.13).

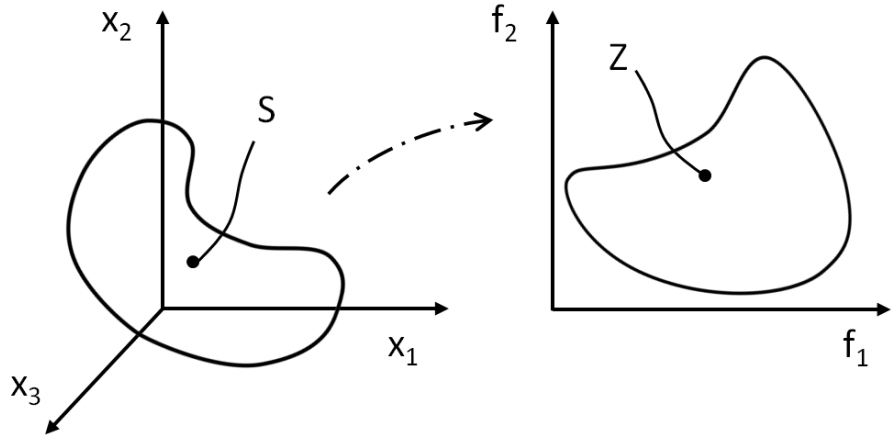


Figure 1.13 - Espace des variables de décision (gauche) et espace des objectifs (droite).

1.4.1.2 Notion de dominance

L'optimisation mono-objectif aboutit à une seule solution optimale. En revanche dans un problème d'optimisation multicritère il est très peu probable qu'une seule solution puisse être la meilleure sur tous les critères à la fois car ils sont souvent contradictoires. Il existe alors des relations de dominance dans Z entre les solutions de l'espace S. Cette notion de dominance est basée sur la comparaison des valeurs des fonctions objectif des solutions de l'ensemble S ou, autrement dit, sur la comparaison de leur valeurs dans l'espace des objectifs Z. Ainsi, une solution $\boldsymbol{x}^{(1)}$ est dite dominante par rapport à une autre solution $\boldsymbol{x}^{(2)}$ si les deux conditions suivantes sont réunies :

- La solution $\boldsymbol{x}^{(1)}$ n'est pas plus mauvaise que la solution $\boldsymbol{x}^{(2)}$ sur tous les objectifs.
- La solution $\boldsymbol{x}^{(1)}$ est strictement meilleure que la solution $\boldsymbol{x}^{(2)}$ sur au moins un objectif.

Cette relation de dominance est illustrée à la Figure 1.14. Sur cette figure le point $\boldsymbol{B} \in Z$ domine $\boldsymbol{C}$ car il est meilleur sur les deux objectifs, mais il est dominé par $\boldsymbol{A}$ car moins bon sur les deux objectifs**.** Par ailleurs, $\boldsymbol{B}$ est indifférent à et $\boldsymbol{E}$ car il est meilleur sur un objectif tout en étant pire sur l'autre. Enfin, $\boldsymbol{B}$ est faiblement dominé par $\boldsymbol{D}$ car ils sont égaux sur un objectif mais $\boldsymbol{D}$ est légèrement meilleur sur l'autre. Ces relations peuvent aussi s'écrire :

$\boldsymbol{B} \prec \boldsymbol{C} \Leftrightarrow F(\boldsymbol{x}^B) \prec F(\boldsymbol{x}^C)$, $\boldsymbol{B}$ domine $\boldsymbol{C}$;

$\boldsymbol{B} \sim \boldsymbol{E} \Leftrightarrow F(\boldsymbol{x}^B) \sim F(\boldsymbol{x}^{\boldsymbol{E}})$ ou $F(\boldsymbol{x}^B) \wedge F(\boldsymbol{x}^{\boldsymbol{E}})$, $\boldsymbol{B}$ est indifférent à $\boldsymbol{E}$;

Il existe aussi d'autres relations plus spécifiques (El-Ghazali Talbi, 2009) :

$\boldsymbol{A} \prec\prec \boldsymbol{B} \Leftrightarrow F(\boldsymbol{x}^A) \prec\prec F(\boldsymbol{x}^B)$, $\boldsymbol{A}$ domine strictement $\boldsymbol{B}$ car il est meilleur sur tous les objectifs ;

$\boldsymbol{D} \preccurlyeq \boldsymbol{B} \Leftrightarrow F(\boldsymbol{x}^A) \preccurlyeq F(\boldsymbol{x}^B)$, $\boldsymbol{D}$ domine faiblement $\boldsymbol{B}$ car il est meilleur ou égal sur tous les objectifs.

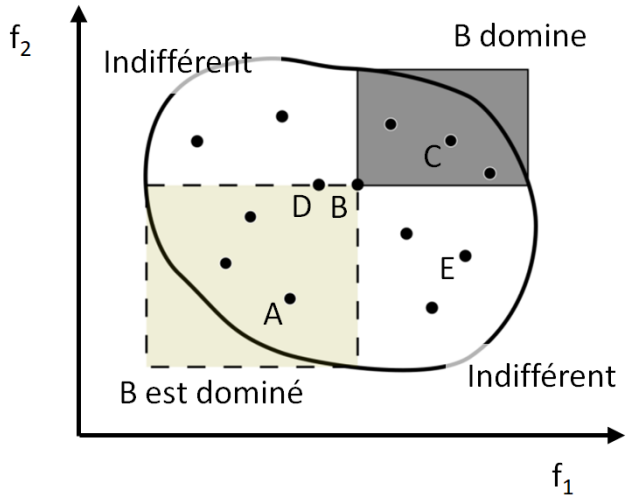


Figure 1.14 – Illustration des relations de dominance entre solutions

1.4.1.3 Optimalité de Pareto

On définit l'optimalité au sens de Pareto à partir de la notion de dominance. Un vecteur de décision $\boldsymbol{x}^* \in S$ est « Pareto optimal » si pour tout $\boldsymbol{x} \in S$, $F(\boldsymbol{x})$ ne domine pas $F(\boldsymbol{x}^*)$, autrement dit, $F(\boldsymbol{x}) \prec F(\boldsymbol{x}^*)$ (El-Ghazali Talbi, 2009).

La solution d'un problème d'optimisation multicritère est un ensemble de solutions dans S appelé « ensemble optimal de Pareto ». La projection des solutions optimales de Pareto dans l'espace des objectifs Z définit le front de Pareto. Chaque point du front de Pareto représente un compromis entre les différents objectifs : il est impossible de trouver une solution qui améliore la performance sur un objectif sans la dégrader sur au moins un autre objectif. Chaque solution du front de Pareto est non dominée comme l'illustre la Figure 1.15.

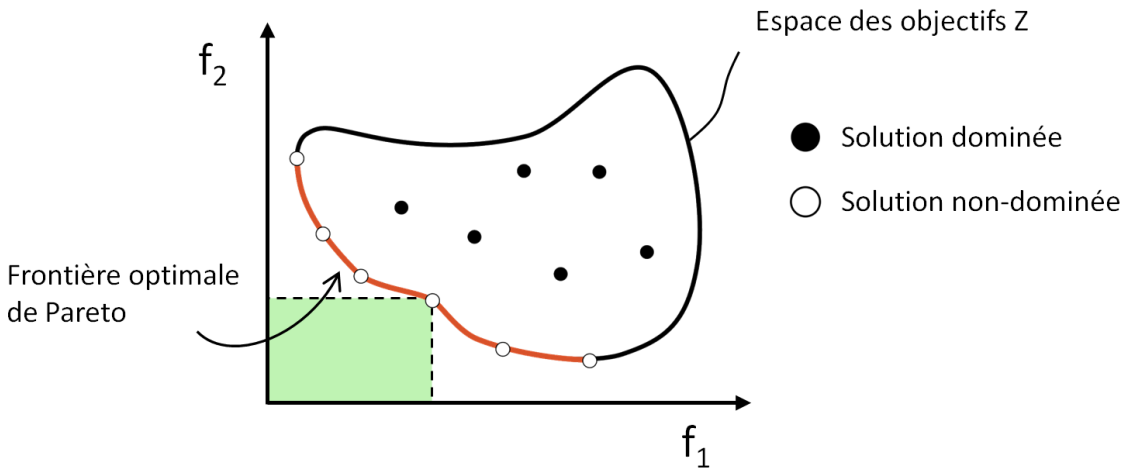


Figure 1.15 – Illustration de la frontière de Pareto dans l'espace des objectifs Z

La frontière optimale de Pareto représente le front de Pareto réel ou global du problème d'optimisation. Le but pour un décideur est d'obtenir un front de Pareto qui s'approche le plus possible de ce front de Pareto global, et dont les solutions couvrent suffisamment et uniformément cette frontière. Ces deux caractéristiques sont appelées convergence et diversité du front de Pareto (Figure 1.16). La qualité de la convergence et de la diversité du front de Pareto dépendent de la complexité du problème d'optimisation, du choix de l'algorithme d'optimisation et du paramétrage optimal de cet algorithme. Néanmoins, certains algorithmes d'optimisation comme ceux de la famille des

métaheuristiques ne peuvent pas garantir la convergence exacte vers le front de Pareto réel à cause du caractère stochastique ou aléatoire de leurs principes de fonctionnement.

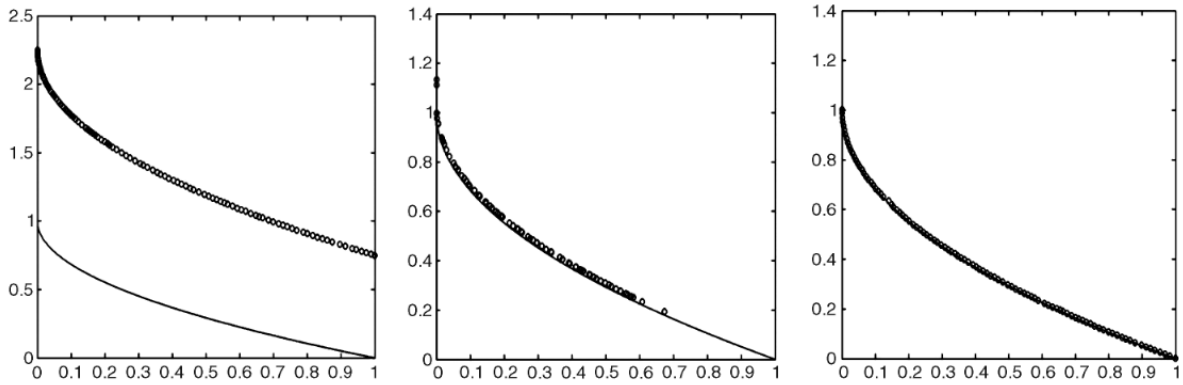


Figure 1.16 – Exemples de fronts de Pareto : mauvaise convergence et bonne diversité (gauche), bonne convergence et mauvaise diversité (centre), bonne convergence et bonne diversité (droite). Source : El-Ghazali Talbi (2009)

1.4.1.4 Point idéal, point de référence et point Nadir

Le point idéal est, comme son nom l'indique, le point qui minimiserait idéalement toutes les fonctions objectif. Il s'exprime $y^* = (y_1^*, y_2^*, \dots, y_M^*)$ tel que $y_i^* = \min\big(f_i(x)\big), x \in S, i \in [1, M]$. Ce point correspond à une solution théorique qui n'existe généralement pas dans l'espace de décision.

Le point idéal peut aider le décideur à situer des niveaux de satisfaction à atteindre pour chaque objectif. Les niveaux de satisfaction $\bar{z}_i$ pour chaque objectif f_i forment un point de référence $z^* = [\bar{z}_1, \bar{z}_2, \dots, \bar{z}_M] \in Z$. Une solution satisfaisante est une solution optimale du front de Pareto qui remplit tous les niveaux de satisfaction de référence.

Le point Nadir correspond comme le point idéal à une solution qui n'existe pas dans l'espace de décision, mais il indique le point qui maximiserait toutes les fonctions objectifs. Les points idéal, de référence et Nadir sont illustrés sur la Figure 1.17.

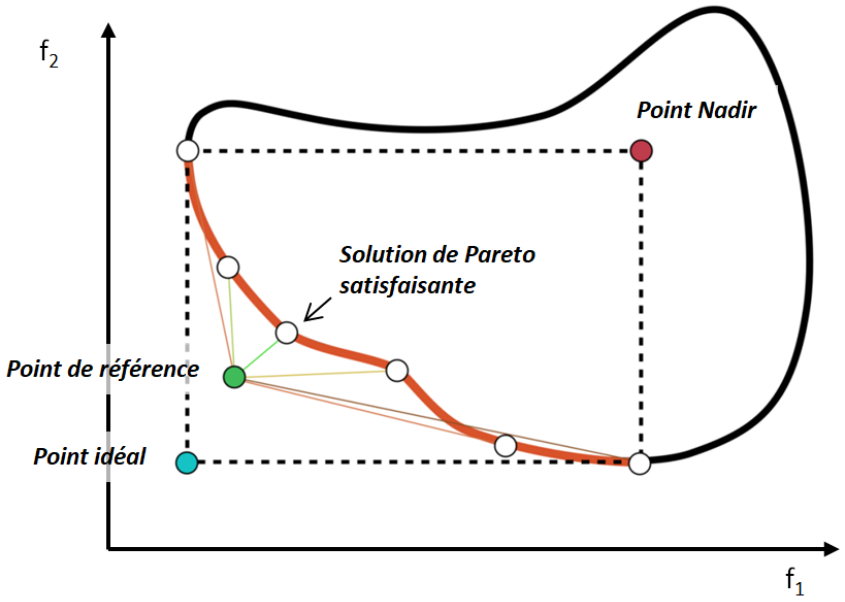


Figure 1.17 – Illustration des points idéal, de référence et Nadir, d'une solution de Pareto satisfaisante et de la frontière de Pareto

1.4.1.5 Aide à la décision multicritère

L'optimisation multicritère s'inscrit dans une démarche d'aide à la décision multicritère avec comme but d'aider le décideur à trouver une solution de Pareto qui corresponde à ses attentes. Les solutions du front de Pareto ne pouvant pas être classées seulement par l'algorithme, le décideur doit apporter ses préférences en termes d'objectifs à un moment ou un autre de la procédure d'optimisation. On distingue trois cas d'interaction entre le décideur et l'algorithme.

A priori : dans cette approche les préférences sont exprimées par le décideur en amont de la procédure d'optimisation sous forme de poids assignés à chaque fonction objectif. Ainsi le problème d'optimisation multicritère est ramené à un problème monocritère qui identifie une solution optimale unique. Cette approche est très incertaine. Elle suppose que le décideur ait une connaissance suffisante du problème, de ses possibilités et de ses limitations dans l'espace des objectifs. Cela suppose aussi que le décideur sache déterminer un compromis de préférence pour des fonctions objectif qui ne sont pas

comparables. Si la connaissance du problème n'est pas suffisante cette approche peut aboutir à une solution peu pertinente.

A posteriori : dans cette approche la procédure d'optimisation génère un ensemble de solutions de Pareto. Ces solutions peuvent fournir au décideur de l'information utile sur le problème, grâce à l'analyse du front de Pareto global et des caractéristiques des solutions optimales de Pareto. Cette analyse peut se faire grâce à des outils de visualisation avancée ou de traitement des données. Le décideur peut ainsi choisir de manière informée la solution de Pareto qui lui correspond le mieux. Des préférences en termes d'objectifs peuvent aussi être exprimées *via* un point de référence et permettre de choisir la solution de Pareto la plus proche. Cette approche est néanmoins plus complexe que la précédente et repose sur l'identification d'un front de Pareto de bonne qualité en termes de convergence et de diversité.

Interactive : dans cette approche les interactions entre le décideur et l'algorithme d'optimisation se déroulent au fur et à mesure du processus d'optimisation. Le décideur peut suivre la résolution du problème et les solutions, en tirer de l'information et ajuster ses préférences. Celles-ci sont indiquées à l'algorithme pendant le processus d'optimisation. Différentes méthodes existent pour exprimer ces préférences, par exemple avec un point de référence précédemment décrit ou avec une direction de référence (El-Ghazali Talbi, 2009). Cette approche a l'avantage d'aboutir à une solution Pareto optimale qui correspond le mieux aux attentes du décideur. Néanmoins, elle peut être plus complexe à mettre en œuvre que la précédente, l'analyse et la visualisation devant se dérouler en temps réel. En pratique elle peut aussi être difficilement applicable à des procédures d'optimisation qui prennent de nombreuses heures à calculer.

1.4.1.6 Classification des problèmes d'optimisation

Le choix d'un l'algorithme pour résoudre un problème d'optimisation dépend de la complexité et des caractéristiques de ce problème. Les algorithmes d'optimisation sont conçus pour résoudre efficacement certains types de problèmes et sont peu efficaces sur d'autres. Une bonne connaissance de l'espace de décision et de la forme de l'espace des objectifs d'un problème d'optimisation permet de choisir l'algorithme le plus adapté.

Le premier critère de classification évoqué dans cette section est le nombre de fonctions objectif. Un problème est monocritère (ou mono-objectif) s'il contient une seule fonction objectif. Sa résolution aboutit à une solution optimale unique, plus simple que l'ensemble optimal de Pareto issue d'un problème multicritère comme décrit précédemment. Dans la littérature, le terme anglophone *many-objective* est utilisé lorsque le nombre de fonctions objectif est supérieur à trois (Deb et Jain, 2014). Un nombre élevé de fonctions objectif contradictoires complexifie l'espace des objectifs. Il faut alors un plus grand nombre d'itérations pour obtenir un nombre suffisant de solutions non dominées qui puissent couvrir uniformément le front de Pareto global.

La forme de l'espace des objectifs va dépendre également de l'espace de décision et de la présence ou non de contraintes. Les variables de décision peuvent être quantitatives ou qualitatives et se déclinent en (Coelho et al., 2015) :

- variable continue : elle prend une infinité de valeurs réelles dans son intervalle de définition ;
- variable discrète : elle prend un nombre fini de valeurs ordonnées dans son intervalle de définition ;
- variable catégorielle ordonnée : aussi appelée variable qualitative ordinale, elle représente des états ordonnés par intensité ou quantité (p. ex. 'petit', 'moyen', 'grand') ;
- variable catégorielle non-ordonnée : aussi appelée variable qualitative nominale, elle représente des états qui ne peuvent pas être ordonnés (p. ex 'béton', 'béton de chanvre', 'terre-paille').

Un problème d'optimisation est mixte si son espace de décision comporte des variables de différents types. Dans le cas où les variables de décision sont statiques, on parle d'optimisation paramétrique. Le problème est dynamique si des variables de décision dépendent du temps. Ce dernier cas correspond des problèmes d'optimisation programmatique ou combinatoire le plus souvent utilisés pour la planification et le pilotage optimal.

Un problème est monodimensionnel si l'espace de décision ne comporte qu'une seule variable de décision et multidimensionnel s'il en comporte plusieurs. Un problème continu

monodimensionnel est relativement simple à résoudre par des méthodes d'encadrement du minimum comme la dichotomie ou l'interpolation polynomiale. Néanmoins, il est très rare de rencontrer cette configuration dans une optimisation de système réel et complexe comme le bâtiment. Le caractère multidimensionnel, discret et catégoriel de l'espace de décision ainsi que les contraintes sur cet espace et sur l'espace des objectifs peuvent rendre le problème d'optimisation discontinu, non dérivable, non linéaire, concave et/ou multimodal.

1.4.1.7 Choix de l'algorithme d'optimisation

On peut différencier les algorithmes d'optimisation en deux grandes familles : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques. Les méthodes déterministes suivent une procédure fixée à l'avance et sont reproductibles : elles vont donner les mêmes résultats à chaque fois qu'elles traitent un même problème d'optimisation (mêmes objectifs, espace de décision et contraintes). Les méthodes stochastiques contiennent des mécanismes aléatoires qui les rendent non-reproductibles, chaque procédure étant unique dans son déroulement (Xin-She Yang, 2010), par exemple à cause du caractère aléatoire des opérateurs de mutation et de croisement en algorithme génétique.

Les méthodes déterministes sont généralement très efficaces et rapides pour identifier l'optimum global d'un problème convexe, unimodal et de dimension peu élevée (faible nombre de variables de décision). On peut distinguer dans les méthodes déterministes celles basées sur le calcul du gradient (indirectes) et celles sans gradient (directes), ces méthodes pouvant être adaptées ou non aux problèmes linéaires (Figure 1.18).

Les méthodes par gradient exploitent la dérivabilité de la fonction objectif et fonctionnent particulièrement bien sur les fonctions lisses et unimodales. Néanmoins, elles sont peu efficaces en présence de discontinuités et ne sont pas applicables aux problèmes *black box*/non dérivables. Parmi ces méthodes, on peut citer les algorithmes du gradient conjugué ou de Newton-Raphson. Il est toutefois possible de les appliquer à un modèle de substitution qui fournit une approximation continue de la fonction objectif réelle et qui gère les éventuelles discontinuités en étant continue par morceau (Meckesheimer et al., 2001). Parmi les méthodes d'approximation, il existe les polynômes d'interpolation, les techniques de krigeage, de chaos polynomial ou de fonction à base radiale. La limite

principale à cette approche est l'incertitude élevée qui peut exister dans les modèles d'approximation.

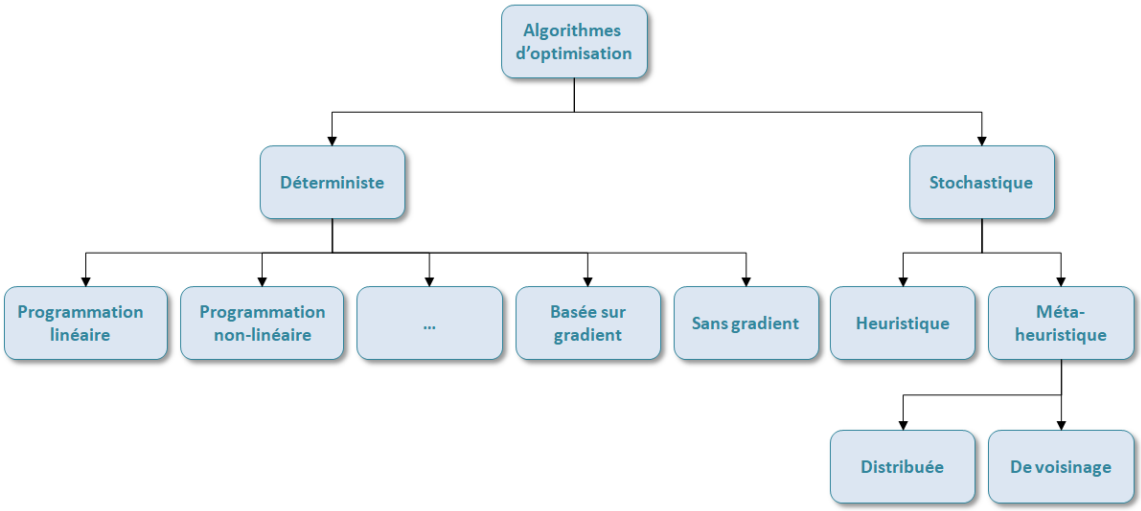


Figure 1.18 – Classification des algorithmes d'optimisation extrait de Xin-She Yang (2010)

Les méthodes déterministes directes, ou sans gradient (*gradient-free*), peuvent exploiter directement la valeur d'une fonction objectif issue d'un modèle « boite noire ». Elles comprennent entre autres les méthodes du simplex (programmation linéaire), de Nelder-Mead ou de Hooke-Jeeves. Elles sont basées sur la manipulation géométrique des solutions et les identifications successives d'optimums locaux pour atteindre l'optimum global. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles dépendent fortement du point de départ de l'optimisation, ce qui les rend peu efficaces pour les problèmes multidimensionnels à combinatoire élevée, et que dans des problèmes multimodaux elles peuvent « être piégées » dans des optimums locaux.

Les méthodes d'optimisation stochastique ont l'avantage essentiel de pouvoir gérer les problèmes complexes (discontinus, non linéaires, et multimodaux), *black box*, multicritères, multidimensionnels et de combinatoire élevée en un temps de calcul moindre qu'avec des méthodes déterministes. À cause de la complexité de ces problèmes et de la part d'aléatoire des algorithmes, les méthodes stochastiques ne garantissent pas d'atteindre le front de Pareto exact mais seulement une approximation de celui-ci. Elles favorisent donc la vitesse de convergence au détriment de la précision et de l'optimalité globale. Leur

principe repose sur des mécanismes aléatoires d'essai et erreur combinés à une recherche locale, souvent bio-inspirés de phénomènes physiques ou biologiques. Parmi les méthodes stochastiques on distingue les heuristiques et les métaheuristiques. Les méta-heuristiques peuvent à leur tour être divisées en deux catégories : les métaheuristiques distribuées (*population based*) et les métaheuristiques de voisinage (*trajectory based*). La littérature ne fournit pas de consensus clair quant à la différenciation entre heuristiques et métaheuristiques d'après Xin-She Yang (2010) qui indique que les métaheuristiques sont « de niveau plus élevé » que les heuristiques. De la même manière, El-Ghazali Talbi (2009) définit les heuristiques comme des méthodes plus spécifiques à certains problèmes et les métaheuristiques comme des méthodes pouvant être adaptées à tous types de problème. Pourtant certaines classifications portent à croire que la catégorie des heuristiques est une autre appellation pour les métaheuristiques de voisinage, et que métaheuristiques est une appellation générale pour les métaheuristiques distribuées (Recht, 2016).

Les méthodes métaheuristiques de voisinage (ou heuristiques) sont basées sur une recherche locale en faisant progresser une seule solution à la fois. Ces méthodes sont simples à implémenter et particulièrement adaptées aux problèmes discrets. Quelques exemples de méthodes sont le recuit simulé (*simulated annealing*) qui mime un cycle de refroidissement et de réchauffage de matériau métallurgique, la recherche tabou (*tabu search*), la recherche à voisinage variable ou encore l'escalade de collines (*hill climbing*).

Les méthodes métaheuristiques distribuées reposent sur la manipulation de plusieurs solutions à la fois leur permettant de ne pas être piégées dans des minimums locaux. Elles sont construites autour de trois mécanismes principaux (El-Ghazali Talbi, 2009) :

- l'assignation d'une valeur de *fitness* des fonctions objectif aux solutions explorées ;
- la préservation de la diversité des solutions dans l'espace des objectifs et/ou de décision ;
- l'élitisme ou l'archivage et la réutilisation des solutions optimales de Pareto tout au long de la procédure.

Parmi ces méthodes, on retrouve la famille des algorithmes évolutionnaires et celle des essaims intelligents :

- Les algorithmes évolutionnaires s'inspirent des principes de la théorie de l'évolution de Darwin en appliquant des opérateurs de croisement et de mutation à une population de solutions et en préservant les meilleurs individus par des mécanismes d'élitisme. Les algorithmes évolutionnaires les plus populaires sont NSGA-II (Deb et al., 2002), la programmation évolutionnaire, la programmation génétique ou encore CMA-ES.
- Les algorithmes de type essaims intelligents s'inspirent de l'éthologie. On peut citer les algorithmes d'optimisation par essaim de particules (PSO), de colonie de fourmis, de colonie d'abeilles ou de la goutte d'eau intelligente.

1.4.2 Application de l'optimisation multicritère au bâtiment

Il existe de nombreuses revues de la littérature sur l'usage de l'optimisation en énergétique et écoconception de bâtiment (Evins, 2013 ; Attia et al., 2013 ; Nguyen et al., 2014 ; Machairas et al., 2014 ; Shi et al., 2016 ; Longo et al., 2019 ; Costa-Carrapiço et al., 2020). On peut y trouver des applications variées de l'optimisation :

- en conception avec optimisation des composants et des systèmes (Recht, 2016 ; Azari et al., 2016 ; Ascione et al., 2019 ; Bre et Fachinotti, 2017 ; Yu et al., 2019) ;
- en conception avec optimisation de la forme du bâti (Harkouss et al., 2017 ; Kiss et Szalay, 2020) ;
- en rénovation (Juan et al., 2010 ; Antipova et al., 2014 ; Pannier et al., 2019 ; Costa-Carrapiço et al., 2020 ; García Kerdan et al., 2017) ;
- en dimensionnement et pilotage de systèmes CVC (Yu et al., 2016 ; Ding et al., 2019) ;
- dans une approche multiniveau d'optimisation simultanée de la conception globale et du pilotage des systèmes (Evins, 2015 ; 2016 ; Li et Wang, 2019).

Dans cette thèse, et en particulier cette section, nous nous intéresserons à l'optimisation multicritère en conception globale de bâtiment sans modification de la

forme du bâti, mais les applications en rénovation qui partagent une démarche similaire sont aussi considérées.

Une démarche d’optimisation multicritère en conception de bâtiment se déroule en plusieurs étapes (Longo et al., 2019 ; Nguyen et al., 2014) :

- définition du problème d’optimisation : cas de base (bâtiment existant ou conception préliminaire théorique), fonctions objectif, contraintes et variables de décision de l’optimisation ;
- exécution de la procédure d’optimisation qui va procéder à plusieurs itérations, attribuer des valeurs de fitness aux solutions explorées, jusqu’à atteindre un critère de convergence ;
- post-traitement et analyse des résultats, application éventuelle d’une méthode d’aide à la décision multicritère.

1.4.2.1 Problème d’optimisation en conception de bâtiment

L’optimisation appliquée en conception (ou rénovation) de bâtiment s’inscrit dans une démarche d’amélioration des performances énergétiques, environnementales, économiques, voire sociales pour les aspects de confort des occupants. Ainsi, on retrouve le plus souvent dans la littérature les fonctions objectif suivantes (Longo et al., 2019) :

- la minimisation des besoins de chauffage ou de climatisation ;
- la minimisation des consommations d’énergie totales ou de postes en particulier : chauffage, climatisation, éclairage ou ventilation ;
- la minimisation du coût d’investissement ou du coût de cycle de vie qui comprend aussi les coûts opérationnels et d’entretien ;
- la minimisation de l’empreinte carbone ;
- la maximisation du confort thermique des occupants.

Parmi les études en optimisation de bâtiment passées en revue par Nguyen et al. (2014) et Evins (2013), 40 % d’entre elles sont multicritère avec généralement deux ou trois objectifs, le reste étant monocritère. Attia et al. (2013) utilisent un questionnaire pour

sonder les usages en optimisation de bâtiment ; 70 % des répondants utilisent une optimisation multicritère contre 30 % qui utilisent une optimisation monocritère. Longo et al. (2019) dans une revue de littérature plus récente trouvent une approche multicritère dans près de 75 % des études. L'approche multicritère est la plus appropriée pour traiter d'objectifs souvent contradictoires dans la réalité, le cas le plus souvent rencontré étant la diminution simultanée des coûts et de la consommation d'énergie.

Généralement, les valeurs de fitness des objectifs énergétiques et de confort sont calculées grâce à des modèles de simulation énergétique dynamique (SED) pour fournir des données horaires suffisamment précises des flux énergétiques d'une solution de conception (Longo et al., 2019). De façon analogue, les valeurs de fitness d'objectifs environnementaux peuvent être calculées avec des modèles d'ACV. Ces modèles sont de type boîte noire : ils ne permettent pas un accès direct à leurs équations thermophysiques ou environnementales mais seulement un accès à des entrées et des sorties. L'optimisation de bâtiment est donc très souvent une optimisation *black box* et qui ne permet pas l'usage de méthode d'optimisation par descente de gradient (Costa et al., 2017).

Pour atteindre leurs objectifs, les décideurs peuvent adopter plusieurs stratégies simultanées mais parfois contradictoires : minimiser les besoins thermiques du bâtiment, appliquer des stratégies passives et bioclimatiques, installer des systèmes CVC performants, installer des systèmes de production d'énergie renouvelable et utiliser des matériaux biosourcés. De nombreuses solutions techniques existent en accord avec ces stratégies et peuvent constituer des variables de décision en optimisation (Attia et al., 2013) :

- la forme et l'agencement du bâtiment ;
- la géométrie, la position et la surface des fenêtres ;
- la constitution de l'enveloppe du bâtiment : matériaux utilisés, menuiseries (p. ex. type de vitrage) ;
- les types d'éclairage et d'occultation ;
- le dimensionnement de systèmes CVC et de production d'énergie renouvelable ;

- l’installation de systèmes de stockage d’énergie.

Le plus souvent, l’optimisation est globale et fait varier simultanément des paramètres de l’enveloppe, des systèmes CVC et de production d’énergie renouvelable. Certaines solutions techniques vont avoir des effets à la fois positifs sur un aspect du bâtiment et négatifs sur d’autres. Par exemple, une plus grande baie vitrée au sud favorise les apports solaires en hiver mais risque d’augmenter les besoins de refroidissement en été. L’application d’un occultant en été permet de réduire les besoins de refroidissement mais peut augmenter les besoins d’éclairage ou réduire le confort lumineux des occupants. Dans ce contexte, l’utilisation de l’optimisation multicritère est très avantageuse car elle permet l’exploration automatique d’un large éventail de solutions techniques et d’en identifier les compromis optimaux.

Un aspect pratique qui va caractériser l’espace de décision est la disponibilité réelle des produits de construction. Dans la réalité, les produits sont standardisés avec un nombre fini de variantes de leurs propriétés physiques ou techniques. Par exemple, il est peu probable de pouvoir acheter 14,2 cm d’isolant de laine de verre ; de plus, un système photovoltaïque est assemblé avec plusieurs panneaux individuels d’une surface unitaire, par exemple 2 m². Ces variables sont discrètes. D’autres choix de construction sont traités par des variables catégorielles comme le type d’isolant (p. ex. laine de verre ou polystyrène) ou le type de fenêtre (p. ex. double vitrage ou triple vitrage). Un espace de décision discret et catégoriel signifie une combinatoire qui augmente exponentiellement à chaque variable et qui peut induire des discontinuités et des optimums locaux dans la fonction objectif. De la même manière, l’ajout de contraintes dans le problème, des sous-espaces de décision et d’objectifs crée également des discontinuités et des miniums locaux.

Un problème d’optimisation de bâtiment est bien souvent non linéaire. Un phénomène courant qui illustre le mieux cet aspect est la réduction des besoins de chauffage et des émissions de CO_2 qui décroissent exponentiellement avec l’épaisseur d’isolant (Figure 1.19). Plus l’espace de décision est varié plus il y a de chances qu’il existe des interactions non linéaires avec l’espace des objectifs. Des analyses de sensibilité en amont de l’optimisation peuvent permettre d’identifier les interactions et les non linéarités du problème (Pannier et al., 2018).

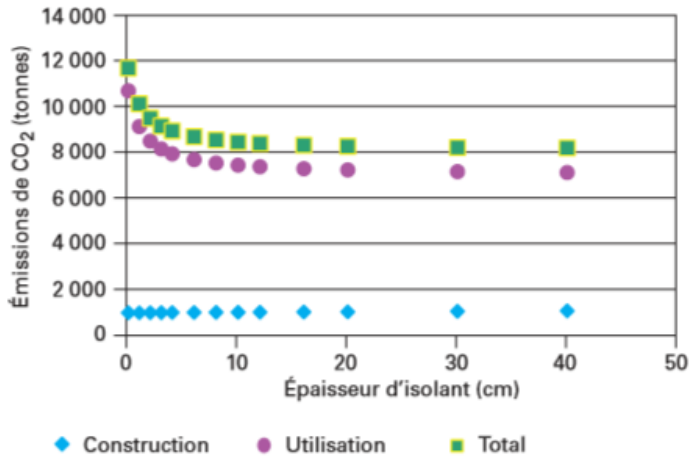


Figure 1.19 – Non-linéarité entre l'émission de CO_2 du cycle de vie d'un bâtiment et l'épaisseur d'isolant. Source : Peuportier (2014)

Un problème d'optimisation en conception de bâtiment est donc souvent multicritère, multidimensionnel, discontinu, *black-box* (non dérivable), multimodal (plusieurs optimums locaux) et non linéaire. Les algorithmes stochastiques sont particulièrement adaptés pour résoudre ce type de problème, c'est pourquoi ils sont particulièrement populaires dans les applications identifiées dans la littérature. Dans la revue de Nguyen et al. (2014), 70 % des études utilisent un algorithme stochastique et 40 % utilisent un algorithme génétique en particulier. Dans la revue de Evins (2013), 75 % des études utilisent un algorithme stochastique dont plus de 50 % utilisent un algorithme génétique en particulier. Dans la revue de Longo et al. (2019), les mêmes observations sont faites avec 69 % des études identifiées qui utilisent un algorithme stochastique dont 44 % qui utilisent un algorithme génétique en particulier.

Longo et al. (2019) ajoutent que les études dans la littérature varient fortement dans leurs applications, leurs problèmes d'optimisation et leurs algorithmes ou outils, ce qui empêche de tirer des conclusions générales ou des recommandations en optimisation et en conception. La seule tendance observable est le consensus sur l'usage des algorithmes méta-heuristiques et notamment génétiques.

La pratique de l'optimisation multicritère en conception présente encore certaines limites et nécessite de nouveaux développements (Recht, 2016). Parmi ceux-là il existe

l'amélioration de la convergence de l'algorithme, l'optimisation d'un grand nombre d'objectifs (> 3), les méthodes d'aide à la décision multicritère et l'optimisation robuste. Dans la suite de cette section sont détaillées les questions des temps de calcul liés à la convergence et les problèmes d'optimisation à plus de trois fonctions objectif. L'optimisation robuste sera développée tout au long de cette thèse. Toutefois, les méthodes d'aide à la décision multicritère ne seront pas abordées en détails dans ces travaux.

1.4.2.2 Temps de calcul et convergence

Les temps de calculs sont un des freins les plus importants à la dissémination de la pratique de l'optimisation chez les professionnels. La majeure partie des temps de calcul provient de la durée d'une simulation énergétique dynamique multipliée par le nombre de solutions explorées durant la procédure d'optimisation. Une optimisation compte de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'évaluation en moyenne (Longo et al., 2019), chaque seconde de plus accordée à l'évaluation d'une solution compte. Deux stratégies permettent d'éviter l'explosion des temps de calcul : réduire le temps d'évaluation et réduire le nombre d'évaluations.

La durée d'évaluation d'une solution dépend du modèle de SED utilisé, de la taille du bâtiment (maison ou immeuble) et du nombre de zones thermiques qui le décrit (monozone, bizone, multizone). La capacité de parallélisation des ordinateurs actuels grâce aux processeurs multicœurs permet une réduction importante des temps de calcul en optimisation. Plusieurs instances du modèle de simulation peuvent être distribuées sur les cœurs (ou plus précisement les « *threads* ») d'un processeur pour évaluer simultanément plusieurs solutions à la fois. Cette implémentation informatique permet de diviser les temps de calcul d'un facteur 2 à 8 avec des ordinateurs de bureau performants (de 2 à 8 cœurs), et encore bien davantage avec des clusters dédiés au calcul scientifique équipés de centaines de cœurs. Un exemple permet d'illustrer l'étendue des temps de calcul qui peuvent exister dans des processus d'optimisation. Pannier et al. (2019) réalisent une optimisation comportant 4536 évaluations avec le modèle de SED Pleiades+Comfie et le logiciel Amapola qui permet une parallélisation sur deux cœurs. La durée totale d'optimisation est de 6 heures ce qui en donne en moyenne une évaluation par SED d'une durée 10 secondes pour chaque solution explorée, le moteur Comfie faisant appel à une

technique de réduction modale permettant de réduire le nombre d'équation en conservant la précision d'un modèle détaillé. En comparaison, Fonseca i Casas et al. (2014) réalisent une optimisation comportant un nombre équivalent de 4096 évaluations avec le modèle de SED Energy+, sans parallélisation. La durée totale des calculs est de 6 jours, avec une durée d'évaluation de 2 minutes par solution. Les durées d'optimisation peuvent donc grandement varier selon les cas d'étude et les outils de SED et d'optimisation.

La diminution du nombre d'individus et/ou nombre de générations de l'optimisation peut permettre de réduire la durée de l'optimisation à condition qu'elle n'altère pas la qualité de la convergence du front de Pareto vers l'optimum global. Pour s'assurer une bonne convergence de la procédure d'optimisation, le choix de l'algorithme le plus adapté est important. Néanmoins, il n'existe pas d'algorithme qui soit performant sur tous les problèmes d'optimisation à la fois : un algorithme A peut être meilleur qu'un algorithme B sur un problème, il sera moins bon que l'algorithme B sur un autre problème. Cette idée est synthétisée par l'expression populaire dans le domaine de l'optimisation : « no free lunch » de Wolpert et Macready (1997). Wortmann et Nannicini (2017) comparent la convergence et la stabilité de différents algorithmes implémentés dans le logiciel Grasshopper sur plusieurs problèmes mono-objectif d'optimisation énergétique de bâtiment. Ils observent que les performances des algorithmes dépendent fortement du problème d'application.

La vitesse et/ou la stabilité de la convergence de l'optimisation peut être améliorée en modifiant le fonctionnement de l'algorithme et de ses opérateurs. Hamdy et al. (2012) implémentent une archive des solutions non-dominées qui n'ont pas été sélectionnées et qui servent dans les opérations de croisement. Evins (2015) modifie la génération de la population initiale avec un échantillonnage homogène de l'espace de décision séquence de Halton plutôt qu'un échantillonnage aléatoire. Xu et al. (2016) appliquent un paramètre de mutation adaptatif qui diminue au fil des générations et en fonction de la distance de *crowding*.

Enfin, une autre solution est de remplacer des évaluations du modèle de SED avec un modèle de substitution ou métamodèle bien plus rapide (Magnier et Haghighat, 2010). Les métamodèles possèdent deux inconvénients principaux : la nécessité de rassembler une large base de données pour que le cadre de validité du métamodèle soit suffisant, et

l'incertitude de leurs résultats. Xu et al. (2016) emploient une optimisation hybride avec un modèle de substitution qui, en alternance et à intervalles réguliers au sein de la procédure d'optimisation (p.ex. toutes les trois générations), est entraîné avec les évaluations passées du modèle de SED puis réalisent une partie des évaluations de solutions. Les auteurs notent une diminution des temps de calcul de 60 % avec une amélioration de la convergence mais une légère baisse de la diversité. Les temps d'entraînement des métamodèles peuvent également être diminués grâce à la parallélisation sur les cœurs de la carte (« *GPU* ») au lieu du processeur (« *CPU* ») (Perera, 2019). Ces exemples montrent des métamodèles construits à partir de données statiques qui fournissent en sortie une donnée agrégée annuellement. Cette résolution temporelle n'est pas cohérente avec l'ACV dynamique et ajoute une incertitude supplémentaire. Des pistes sont encore à identifier dans l'objectif de construire des métamodèles dynamiques applicables en optimisation. La technique de réduction de modèle mise en œuvre dans Comfie rend moins nécessaire le développement d'un métamodèle et le temps de calcul reste faible pour l'ACV.

Finalement, la question de l'acceptabilité de la procédure d'optimisation par les architectes et concepteurs a été étudiée par Naboni et al. (2013). Ils comparent la pratique actuelle de la conception, où un concepteur va optimiser un projet de bâtiment en comparant « à la main » une dizaine de variantes de conception, et l'usage d'un algorithme génétique d'optimisation multicritère qui va identifier automatiquement des solutions optimales parmi une combinatoire de plus de 100 000 variantes possibles. Ils estiment que la durée de travail totale d'un concepteur comprenant la saisie de 10 variantes et l'analyse des résultats est de 23 heures en moyenne. Leur procédure d'optimisation en 1350 évaluations au total, parallélisées sur 2 cœurs et calculées avec Energy+ donne un temps de calcul de 8 heures. Ajoutée aux temps de travail de la saisie du modèle initial, de la configuration des paramètres d'optimisation et de l'analyse des résultats, la pratique de l'optimisation dure 34 heures. Finalement, ils estiment que la solution optimale obtenue « à la main » atteint un potentiel d'optimalité de 61 % contre 100 % pour les solutions issues de l'optimisation en les comparant à l'optimum global obtenu par le calcul brut de la combinatoire. Ainsi, le temps de travail supplémentaire de l'optimisation (qui correspond principalement à un temps d'attente durant la procédure) est faible en comparaison du gain d'optimalité des solutions de conception. Cette étude nous apprend que la pratique de

l'optimisation multicritère peut être acceptable à condition que sa durée n'excède pas une dizaine d'heures de calcul ce qui peut correspondre à un objectif raisonnable lors du développement d'une démarche d'optimisation.

1.4.2.3 Optimisation d'un grand nombre d'objectifs

On appelle optimisation d'un nombre élevé d'objectifs, ou *many-objective optimisation*, un problème d'optimisation avec plus de trois fonctions objectif. Ce type de problème apporte plusieurs difficultés aux algorithmes multi-objectifs classiques :

- Le nombre de solutions non-dominées augmente de façon exponentielle avec le nombre d'objectif. Ishibuchi et al. (2008) trouvent qu'au-delà de 12 fonctions objectif presque 100 % de la population contient des solutions non-dominées. Cela a pour conséquence de réduire fortement l'efficacité des procédures de sélection basée sur la dominance et de détériorer la convergence de l'algorithme.
- Le front de Pareto global est une hyper-surface de l'espace des objectifs. Ainsi, le nombre de solutions de Pareto nécessaire pour couvrir uniformément le front augmente exponentiellement avec le nombre de fonctions objectif. Obtenir un nombre suffisant de solutions peut nécessiter plus d'itérations de l'algorithme et de temps de calcul. La prise de décision peut aussi être compliquée par un trop grand nombre de solutions possibles (Ishibuchi et al., 2008).
- La mesure de la diversité devient très coûteuse. La similarité entre solutions d'un espace de décision hautement dimensionnel est plus difficile à estimer (Wang et al., 2015).
- Les opérations de croisement peuvent être inefficaces car les solutions non-dominées sont trop éloignées. Des opérateurs de croisement spéciaux peuvent être nécessaires (Deb et Jain, 2014).
- Des mesures de performances comme l'hyper-volume, deviennent exponentiellement coûteuses avec le nombre d'objectifs.
- La visualisation d'un front de Pareto de très haute dimension devient complexe pour le décideur qui doit exprimer des préférences sur un nombre élevé d'objectifs.

Deb et Jain (2014) proposent l'algorithme NSGA-III, aussi appelé *reference-point based NSGA-II*, qui répond aux difficultés d'un problème d'optimisation à plus de trois objectifs grâce à une stratégie de distribution normalisée de points de références dans l'espace des fonctions objectifs. La recherche de solutions non-dominées est ciblée autour de ces points de référence en sélectionnant des parents pour croisement dans un voisinage restreint, assurant ainsi une recherche diversifiée et homogène. Sur la Figure 1.20 sont comparées les surfaces de Pareto de NSGA-II, NSGA-III et l'algorithme évolutionnaire CMA-ES appliqués au problème test concave et uni-modal DTLZ2 à trois fonctions objectifs (Huband et al., 2006). On peut observer la répartition plus homogène des solutions du front autour des points de référence chez NSGA-III.

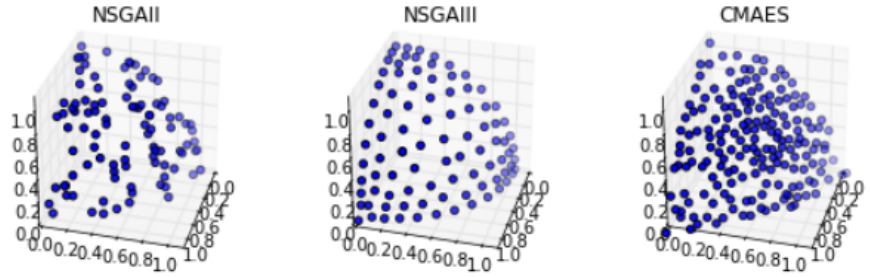


Figure 1.20 - Répartition des solutions des surfaces de Pareto de différents algorithmes d'optimisation pour un problème test DTLZ2 (concave) à 3 fonctions objectif (Hadka – documentation de Platypus)

NSGA-III a été comparé aux deux autres algorithmes d'optimisation *many-objective* MOEA/D-PBI et MOEA/D-TCH et obtient les meilleures performances sur une majorité de problèmes tests notamment sur le test DTLZ3 qui contient plusieurs optimums locaux (Deb et al., 2005). Ishibuchi et al. (2016) montrent que NSGA-III n'est pas plus performant que NSGA-II sur tous les tests DTLZ avec un nombre élevé de fonctions objectif. Néanmoins il s'agit de leur propre interprétation et implémentation de l'algorithme qui peut comporter des différences par rapport à la version originale de Deb. En effet, le code original de l'algorithme n'a pas été rendu public jusqu'à son implémentation récente en

2020 dans la librairie Python Pymoo[7] (Blank et Deb, 2020). D'autres implémentations non coordonnées par Deb, l'auteur de l'algorithme, existent dans les librairies Python DEAP et Platypus, en Java (jMetal[8], *MOEA Framework*[9]) ou Matlab[10].

Les algorithmes d'optimisation *many-objective* présentent un grand intérêt en optimisation de bâtiment où il existe un grand nombre de critères à optimiser liés entre autres à l'efficacité énergétique, à l'environnement, au coût et au confort. La littérature est encore naissante sur le sujet étant données les difficultés de temps de calcul et d'aide à la décision qui peuvent encore subsister avec les méthodes d'optimisation à deux ou trois critères.

Son et Kim (2016) appliquent NSGA-III à l'optimisation de la rénovation d'un bâtiment avec quatre objectifs : la minimisation de la consommation annuelle d'énergie, de l'émission de CO_2 associée à cette consommation et du coût de rénovation, et la maximisation du confort thermique.

Pannier et al. (2019) appliquent NSGA-III à l'optimisation de la rénovation d'un hôtel en intégrant une ACV complète. Leur problème d'optimisation comporte quatre objectifs à minimiser : le coût de rénovation, la consommation d'énergie primaire et les deux indicateurs en ACV du changement climatique et de la toxicité environnementale calculés sur les étapes d'utilisation et de fin de vie.

Son et Kim (2018) réalisent une comparaison intéressante des performances de quatre algorithmes évolutionnaires sur un problème d'optimisation de rénovation de bâtiment comprenant quatre fonctions objectif. Les algorithmes comparés sont NSGA-II, NSGA-III, MOEA/D et MOPSO (algorithme d'essaim de particules). Les quatre fonctions objectif sont : la minimisation de la consommation annuelle d'énergie, de l'émission de CO_2 associée à cette consommation et du coût de rénovation, et la maximisation du confort

[7] https://pymoo.org/

[8] https://github.com/jMetal

[9] https://github.com/MOEAFramework

[10] https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/60678-nsga-iii-in-matlab

thermique. Deux mesures de la performance sont évaluées pour chaque algorithme : la distance à un front de Pareto global (équivalent à la convergence) et la diversité des solutions non-dominées. Les auteurs observent sur leur cas d’étude que NSGA-III est le plus performant sur les deux critères et NSGA-II le plus mauvais.

1.5 Incertitudes et écoconception robuste

Dans sa définition la plus stricte l'incertitude représente l'écart entre la connaissance explicite d'une quantité et sa valeur réelle. Un modèle est l'assemblage numérique de relations entre des données à des fins de représentation de phénomènes réels. On peut ainsi distinguer trois sources primaires d'incertitudes dans une activité de modélisation : les relations entre les données (modélisées sous forme d'équations plus ou moins complexes), les données (qualité et représentativité) et les choix. La validation consiste à comparer la valeur d'une donnée calculée ou mesurée et la valeur « réelle » pour attester de la fiabilité d'un modèle. Cette forme de validation n'est pas réalisable en ACV car il est impossible de mesurer l'impact réel d'un produit à l'issue de son cycle de vie car cela voudrait dire avoir une compréhension exhaustive de tous les mécanismes environnementaux, économiques et humains, et un accès complet aux interactions passées entre ces systèmes et le système d'étude (Oreskes et al., 1994). La seule forme de validation possible en ACV est la validation individuelle de chacun de ses constituants (données d'inventaires, modèles de caractérisation, paramètres des modèles d'inventaire, etc.) dans le but de former un modèle cohérent et fiable (Finnveden et al., 2009). D'autre part il faut compléter ces sources d'incertitudes épistémiques par la dimension temporelle qui apporte des incertitudes prospectives dans toute approche de modélisation qui se situe en amont de l'existence d'un produit ou d'une décision. Ce cas de figure est bien sûr rencontré en écoconception de bâtiment, un système à la durée de vie très longue. Il est alors nécessaire d'adopter des méthodes d'exploration de ces incertitudes afin d'avoir une meilleure compréhension des conséquences qu'elles peuvent avoir sur le cycle de vie d'un bâtiment, d'améliorer la fiabilité de la prise de décision et d'aider à éco-concevoir des bâtiments de manière robuste (Huijbregts, 1998).

Dans cette section sont d'abord présentés les types et les sources d'incertitudes de l'ACV en général et les méthodes de quantification de ces incertitudes. Puis les spécificités du cycle de vie des bâtiments sont abordées : son caractère complexe, la manière dont il est modélisé en ACV et ses sources d'incertitudes propres. Parmi celles-ci l'évolution future du bâtiment est une source essentielle d'incertitudes épistémiques qui nécessite d'aborder une approche prospective. Enfin, on présente les travaux qui ont été menés sur les

incertitudes prospectives dans chaque communauté scientifique en lien avec le sujet de cette thèse, celle de l'énergétique du bâtiment, de l'analyse de cycle de vie et de l'aide à la décision robuste. Cet état de l'art permettra finalement d'établir le cadre de développement d'une méthode d'optimisation multicritère robuste en écoconception.

1.5.1 Incertitudes et prospective en ACV

1.5.1.1 Types et sources d'incertitudes en ACV

La communauté de l'ACV s'intéresse aux problématiques liées aux incertitudes et à la qualité des données dès 1992, puis à partir de la fin des années 1990 des classifications sont proposées et des outils pour analyser les incertitudes se développent (Pannier, 2017a).

Les premiers cadres de référence dans la classification des incertitudes en ACV ont été proposés par Huijbregts (1998) et Björklund (2002). On y distingue les sources des types d'incertitude. Les sources correspondent aux éléments incertains en entrée du modèle d'ACV, aussi appelés les facteurs incertains. Les types sont les différentes formes dans lesquelles s'expriment ces incertitudes. Les incertitudes suivantes peuvent être concernées par ces types d'incertitudes (suivis d'exemples de leurs sources) :

- Les données et les paramètres : incertitudes liées aux imprécisions, aux données incomplètes et au manque de représentativité (géographiquement, temporellement et technologiquement, voir section 1.3.1.1). L'incertitude sur les données concerne les étapes de l'ICV et de la caractérisation des impacts mais aussi les paramètres d'entrée des modèles sous-jacents.
- Les modèles : toutes les données qui dérivent de modèles sont sujettes aux incertitudes de ces modèles. Il s'agit par exemple de simplifications ou d'approximations trop importantes dans les équations, d'une perte de précision par agrégation temporelle (modèle statique ou modèle dynamique) et spatiale, de modèle linéaire au lieu de modèle non-linéaire. Les modèles peuvent être utilisés durant l'ICV pour simuler des procédés de premier-plan ou d'arrière-plan, et pendant l'évaluation où ils fournissent indirectement des facteurs de caractérisation.

- Les choix méthodologiques : les choix concernent toutes les étapes, par exemples le choix de l'unité fonctionnelle, des frontières du système, des méthodes d'allocation et des catégories d'impact.
- Les erreurs : elles peuvent intervenir à toutes les étapes de l'ACV comme par exemple des erreurs de saisie ou des oublis.
- L'estimation de l'incertitude : aussi appelée méta-incertitude, elle peut apparaître lors de la définition de fonction de densité de probabilité pour représenter l'incertitude d'un paramètre.
- L'incertitude épistémique : c'est l'incertitude qui est causée par un manque de connaissance sur le système et sur son évolution future.

La variabilité est une autre source d'incertitude dans les résultats de l'ACV. Elle correspond à des fluctuations inévitables et inhérentes au monde réel. Trois types de variabilité peuvent être distingués :

- La variabilité temporelle : elle apparait au niveau de l'inventaire et de la caractérisation des impacts. Elle concerne la variation temporelle de procédés, par exemple les procédés du système de production électrique durant l'année, ou des phénomènes environnementaux comme la variabilité météo naturelle.
- La variabilité spatiale : correspond à la variation géographique et à l'agrégation géographique de ces variations.
- La variabilité technologique et des individus : il s'agit par exemple des variations des émissions et ressources qu'il peut y avoir entre des procédés équivalents ou de la variation parmi les individus (poids, âge) qui peut influencer les impacts sur la santé. La variabilité inhérente aux décisions humaines peut également se situer dans cette catégorie.

Contrairement aux incertitudes, la variabilité ne peut pas être réduite mais seulement mieux prise en compte dans le modèle d'ACV. Une meilleure représentation de la variabilité passe par l'usage de données de meilleure résolution temporelle, spatiale et technologique. Ces données peuvent être issues de modèles plus précis, comme c'est le cas

avec la modélisation du système électrique qui fournit des données de mix électrique de résolution horaire, ou l'usage de données d'inventaire régionalisées (Mutel et al., 2012). Ces exemples permettent de réduire l'incertitude des résultats d'ACV mais vont aussi apporter de nouvelles sources d'incertitudes (qui ont *a priori* une plus faible contribution à l'incertitude finale que la précédente variabilité), qui sont respectivement les incertitudes du modèle et de ses données (variables d'entrée et paramètres), et la représentativité spatiale des données d'inventaire.

Tous les types d'incertitude, à l'exception de l'incertitude épistémique, peuvent en théorie être réduits grâce à plus de recherches pour trouver de meilleures données et créer de meilleurs modèles. Cette solution se heurte toutefois à la réalité de la prise de décision qui restreint le temps et les moyens pouvant être alloués à cette tâche. Il est donc nécessaire de diminuer les incertitudes en priorité sur les aspects les plus influents en ACV. Ceux-là peuvent être identifiés grâce à une analyse de sensibilité (Pannier et al., 2018).

1.5.1.2 Méthodes de quantification des incertitudes

Les travaux en lien avec la quantification des incertitudes et la fiabilité en ACV se sont multipliés dans la littérature ces dernières années (Pannier, 2017). Plusieurs méthodes de quantification des incertitudes ont été développées et implémentées dans les outils principaux de l'ACV (p.ex. SimaPro, openLCA, Brightway2). La base de données d'inventaire ecoinvent contient des distributions de probabilités pour la majorité de ses fiches. Toutefois, malgré leur disponibilité ces méthodes ne sont pas encore entrées dans les pratiques courantes. Une première raison est d'ordre culturel. Par habitude ou préférence, certains décideurs peuvent attendre d'une ACV qu'elle ne fournisse qu'une solution unique (*a priori*) fiable à leur problème alors que l'ACV peut aussi servir à comprendre de manière plus approfondie un problème, analyser ses points sensibles et ses limites pouvant fournir plusieurs solutions possibles (Hellweg et Canals, 2014 ; Olsen et al., 2018). Une deuxième raison est la complexité, l'effort et donc le coût plus important de sa mise en œuvre à cause d'une quantité plus importante de données à rassembler et d'un nombre plus élevé de calculs à réaliser (Huijbregts et al., 2001). Cet effort supplémentaire

s'ajoute à celui déjà requis par la pratique « simple » de l'ACV dont l'implémentation en contexte industriel est une problématique toujours d'actualité (Cluzel et al., 2014).

Plusieurs méthodes de quantification des incertitudes existent :

- la variation paramétrique et l'exploration de scénario : approche déterministe où on calcule des résultats avec différentes valeurs de paramètres et/ou différentes hypothèses ;
- les méthodes d'échantillonnage : approche stochastique qui consiste à propager des incertitudes dans le modèle à partir de distributions de probabilités des facteurs incertains. Une série de calculs est réalisée à partir de tirages aléatoires dans les distributions des facteurs incertains et génère une distribution des résultats en sortie. La méthode d'échantillonnage la plus connue est Monte-Carlo ;
- les méthodes analytiques : la variance en sortie est estimé à partir de développements de Taylor du premier ordre ;
- des méthodes moins conventionnelles comme l'inférence bayésienne et les ensembles flous (Clavreul et al., 2013) .

La méthode de Monte-Carlo est la méthode d'analyse d'incertitude la plus populaire en ACV et dans le domaine de l'évaluation énergétique des bâtiments (Tian et al., 2018). Elle est facilement adaptable à toute sorte de problème et elle est implémentée dans les outils d'ACV cités précédemment. La distribution qu'elle fournit en sortie du modèle permet de calculer des mesures statistiques en termes de moyenne, d'écart-type et de percentiles sur les résultats. L'inconvénient de cette approche est qu'elle peut s'avérer très couteuse en temps de calculs. Plusieurs centaines à plusieurs milliers de simulations sont nécessaires pour obtenir une convergence statistique satisfaisante. Par ailleurs, cette approche est entièrement stochastique et présuppose une connaissance parfaite de la distribution de probabilité d'un facteur incertain sinon sa propagation sera source de méta-incertitude dans les résultats. Son application est donc possible sur tous les types d'incertitudes sauf les incertitudes épistémiques et en particulier les incertitudes prospectives.

Pour comprendre les limites de l'approche stochastique il est nécessaire de distinguer trois niveaux d'incertitude entre détermination de l'incertitude (connaissance statistique) et ignorance totale (Walker et al., 2003):

- L'incertitude statistique : des méthodes stochastiques peuvent être appliquées ;
- L'incertitude par scénario : il existe seulement une connaissance partielle et qualitative de l'incertitude ;
- L'ignorance reconnue : « l'inconnue inconnue ».

Le niveau 1 correspond à l'incertitude due à de la variabilité dont on peut obtenir une connaissance statistique grâce à de nombreuses mesures et observations. L'incertitude épistémique relève essentiellement des niveaux 2 et 3 d'incertitude. La connaissance partielle que l'on peut avoir de ces incertitudes est seulement qualitative et non quantitative et ne permet pas l'emploi de méthodes stochastiques. L'analyse d'incertitudes épistémiques partiellement connues repose principalement sur la propagation de scénarios. Dans le cas particulier d'incertitudes épistémiques liées à une évolution future, le champ de l'ACV prospective fournit un cadre méthodologique à la propagation de scénarios prospectifs.

1.5.1.3 L'ACV prospective

Les études prospectives, aussi appelée « *future studies* » en anglais, ne sont pas une science car elles ne reposent pas sur la validation grâce à des expérimentations contrôlées mais rassemblent les connaissances de tous les domaines scientifiques. La prospective n'est pas une projection, ni une extrapolation, ni une prédiction, mais une approche pluridisciplinaire qui étudie les évolutions majeures en cours dans les pans les plus influents de la société et de l'environnement pour identifier les interactions dynamiques qui peuvent façonner le futur (Pesonen et al., 2000). L'ACV prospective est définie par Olsen et al. (2018) comme l'évaluation rigoureuse d'événements et de développements futurs dans la société, les technologies, l'économie et le contexte réglementaire qui, à long-terme, pourraient considérablement influencer le système d'étude (et/ou son unité fonctionnelle), les conditions sociétales dans lesquelles il s'inscrit et par là-même ses flux et impacts environnementaux. On se permet de compléter cette définition en ajoutant parmi les aspects évolutifs le changement climatique. Il a une influence importante sur l'ACV d'un bâtiment, tant sur les impacts environnementaux que sur l'unité fonctionnelle au regard du confort des occupants.

Weidema (1998) fait l'une des premières mentions des aspects prospectifs en ACV. Il détermine six cadres d'utilisation de l'ACV (Figure 1.21) et souligne l'importance de distinguer ceux qui s'inscrivent dans une démarche rétrospective, comme l'identification des points sensibles ou la déclaration environnementale de produit, et ceux qui s'inscrivent dans une démarche prospective comme la conception de produit et l'élaboration de politiques publiques. Weidema recommande l'usage de scénarios prospectifs lorsque l'horizon temporel dépasse 25 ans. Il souligne que l'incertitude épistémique est inévitable mais qu'elle peut être mieux acceptée et intégrée si les scénarios utilisés sont issus d'un consensus scientifique.

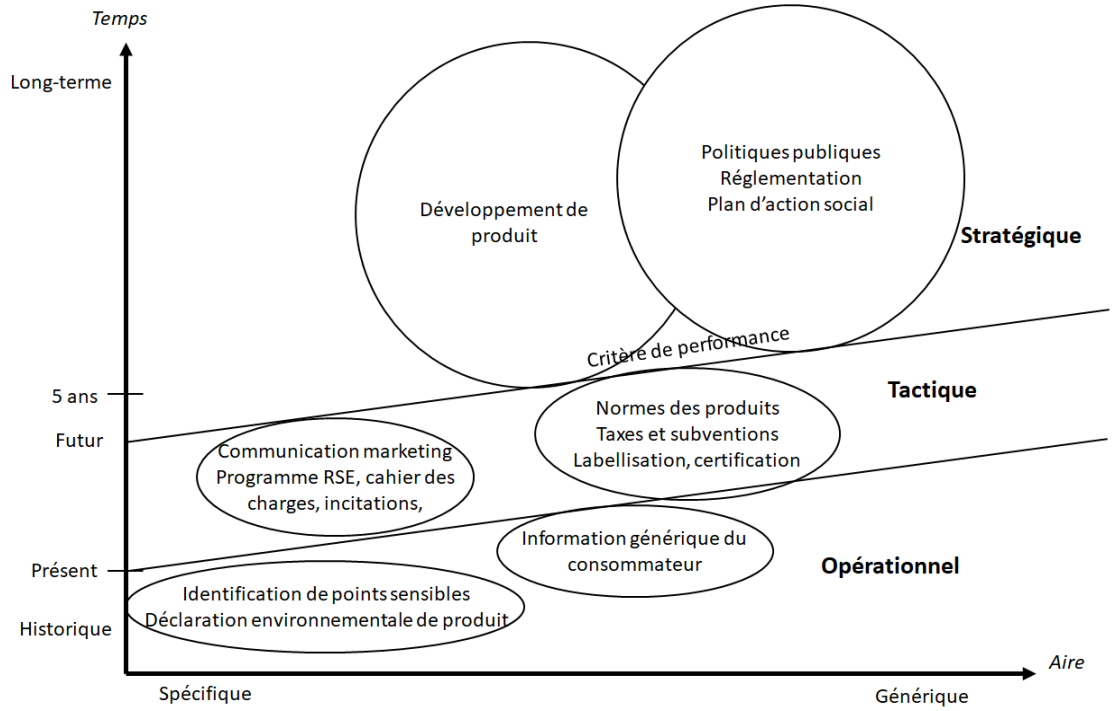


Figure 1.21 – Aires d'application de l'ACV d'après Weidema (1998)

Dans la continuité des travaux de Weidema s'est formé un groupe de travail du SETAC-Europe qui a contribué à élaborer un cadre méthodologique d'utilisation des scénarios en ACV (Pesonen et al., 2000). Un scénario en ACV y est défini comme « la description d'une situation future possible, pertinente dans le cadre d'application de l'ACV, basée sur des hypothèses explicites à propos du futur, et qui inclut (si possible) une

description des développements temporels entre le présent et le futur ». Un scénario doit comporter trois caractéristiques :

- la définition de circonstances alternatives futures ;
- le cheminement entre le présent et la situation future ;
- l'inclusion d'incertitude sur le futur.

Les hypothèses implicites qui ont servi à construire les scénarios doivent être explicitement énoncées dans la définition des objectifs et de l'unité fonctionnelle. Pesonen et al. (2000) recommandent également de considérer un faible nombre de scénarios (de 2 à 4) pour faciliter l'aide à la décision.

Une description plus détaillée des différents types de scénarios et de leurs contextes d'utilisation est fournie par Börjeson et al. (2006). Il est d'abord nécessaire de différencier les facteurs endogènes qui sont contrôlables des facteurs exogènes qui correspondent aux conditions limites du système d'étude et qui sont hors du périmètre d'action des décideurs. Le scénario d'un facteur endogène représente une action future possible des décideurs et le scénario d'un facteur exogène représente une condition future possible dans laquelle s'inscrit le système. Trois grandes catégories de scénarios se divisent en six cas d'usage particuliers :

- Les approches prédictives qui répondent à la question « que va-t-il se passer ? » sont plutôt adaptées aux produits simples et aux horizons de court à moyen-terme. On y retrouve la *prévision* (« *forecast* »), qui étudie le scénario le plus attendu, et l'approche « *et si ?*» (« *what-if* ») qui compare plusieurs événements spécifiques.
- Les approches exploratoires, qui répondent à la question « que peut-il se passer ? », cherchent à décrire des futurs plausibles qu'ils soient désirables, redoutés ou réalisables. Ces approches développent des trajectoires du présent jusqu'à des futurs « équiprobables », qui sont considérés avec le même niveau d'importance. On y retrouve les scénarios externes qui explorent uniquement l'évolution de facteurs exogènes, et les scénarios stratégiques qui comprennent des actions spécifiques des décideurs.
- Les approches normatives qui répondent à la question « comment un objectif spécifique peut être atteint ? » sont basés sur des futurs désirables ou redoutés dont on

cherche à identifier les conditions pour les atteindre ou les éviter. On y retrouve les scénarios conservatifs qui étudient de simples ajustements à la situation présente et les scénarios transformatifs où la structure du système d'étude change nécessairement.

Il existe également l'approche littéralement traduite « pierre angulaire » (« *cornerstone* ») qui appartient à la catégorie exploratoire et correspond plutôt à des objets complexes sur un horizon de long-terme (Cluzel et al., 2014). En pratique plusieurs de ces approches peuvent être combinées dans une étude prospective (Börjeson et al., 2006 ; Olsen et al., 2018).

Börjeson et al. (2006) distinguent trois étapes dans la génération de scénarios :

- la génération d'idées et de connaissances à propos de certains aspects du futur ;
- leur intégration dans des scénarios ;
- l'analyse de leur cohérence.

Plusieurs méthodes existent pour développer des scénarios. Les méthodes quantitatives comprennent entre autres des méthodes d'extrapolation ou les méthodes basées sur des courbes d'apprentissage et des « S-curve » qui modélisent les potentiels de baisse des coûts et de diffusion d'une technologie (Olsen et al., 2018). Dans des problèmes complexes et de long-terme l'usage de ces méthodes quantitatives peut s'avérer limité. Pour certains aspects exogènes du système comme la météo, des modèles quantitatifs peuvent être employés indirectement en faisant appel à des scénarios issus de modèles extérieurs. L'exemple le plus connu est celui des scénarios de forçage radiatifs RCP (*Representative Concentration Pathway*) du GIEC qui ont été spécialement conçus pour être utilisés dans la recherche et qui permettent d'obtenir des scénarios d'élévation des températures jusqu'à 2300 à partir de simulations climatiques (Moss et al., 2010). Les principales méthodes qualitatives de production de scénarios prospectifs sont : la revue de littérature, les méthodes basées sur un panel d'experts (e.g. la méthode Delphi) et des ateliers prospectifs. L'avantage de ces méthodes est la simplicité de mise en œuvre, mais leur inconvénient principal réside dans le biais à la fois des réponses apportées par les personnes interrogées que des questions posées à propos du futur, qui délimitent le champ des futurs envisageables.

L'ACV prospective a été utilisée en rapport avec le développement de technologies émergentes, de technologies de production d'énergie renouvelable et de stockage, ou de la gestion des déchets. Nous abordons ici seulement les applications en dehors du domaine du bâtiment. Une partie des travaux en ACV prospective relatent le développement de scénarios prospectifs sans fournir de résultats quantitatifs quant à leurs impacts environnementaux (Andersen et Bjerrregaard, 2001 ; Rasmussen et al., 2005 ; Frischknecht et al., 2009 ; Münster et al., 2013 ; Meylan et al., 2018). Les applications quantitatives de l'ACV prospective sont encore naissantes dans la littérature. Dans le domaine du photovoltaïque, Dominguez-Ramos et al. (2010) évaluent l'évolution des progrès technologiques de la filière et du mix électrique espagnol entre 2007 et 2030 selon neuf scénarios. Ils observent une diminution moyenne de 60 % du contenu carbone d'un kWh photovoltaïque entre les deux périodes. Marini et al. (2014) utilisent un modèle d'ACV paramétrique de système photovoltaïque et comparent l'empreinte carbone d'un panneau PV domestique en Espagne fabriqué actuellement, avec le même panneau fabriqué en 2050. Des incertitudes sont considérées, entre autres, sur la durée de vie du panneau, l'efficacité des modules, l'irradiation solaire et le mix électrique de fabrication. Ils observent une diminution de l'empreinte carbone de 23,1 gCO_2eq/kWh à 9,8 gCO_2eq/kWh en 2050 avec un écart-type de 0,77 gCO_2eq/kWh dû aux incertitudes. Wender et al. (2014) proposent une méthode d'ACV anticipative et l'appliquent à la comparaison de trois technologies de cellules PV. Ils montrent l'intérêt d'une telle méthode pour orienter la recherche et l'innovation vers les technologies les plus prometteuses d'un point de vue environnemental. Cluzel et al. (2014) réalisent l'ACV d'un système industriel complexe en considérant quatre scénarios d'exploitation possibles dont un scénario pessimiste (pire cas envisageable) et un scénario idéal. Ils montrent que leur approche permet de communiquer au décideur des recommandations chiffrées qui peuvent l'inciter à adopter de meilleures pratiques d'exploitation.

1.5.2 Incertitudes en écoconception de bâtiment

1.5.2.1 Le bâtiment : un système complexe

Cluzel et al. (2014) définissent un système complexe en écoconception à partir des travaux de Blanchard et Fabrycky (2011) en analyse fonctionnelle des systèmes d'ingénierie :

- une grande échelle en termes de nombre de sous-systèmes, de composants, de masse et quantité de ressources utilisées ;
- une durée de vie longue et inconnue, dont le cycle de vie est incertain au moment de sa conception notamment ses phases de rénovation, d'entretien, de maintenance et sa fin de vie ;
- des sous-systèmes qui ont leur propre cycle de vie et durée de vie créant des événements d'obsolescence ;
- des interactions importantes avec l'environnement proche (autres systèmes, site géographique…) ;
- une supervision et une gestion humaine.

Chacun des points de la définition précédente correspond à des caractéristiques du bâtiment. Il est de grande taille (une maison) voire immense (un immeuble, une université). Il est fait de plusieurs tonnes de matériaux et comporte une multitude d'éléments différents : parois, menuiseries, revêtements, équipements, fondations, plomberie, électricité, etc. Il inclut des sous-systèmes tels que des systèmes CVC et de production d'énergie renouvelable. Chacun des éléments et des sous-systèmes du bâtiment a son propre cycle de vie et vieillit avec des conséquences sur sa fonctionnalité et ses performances. La durée de vie d'un bâtiment est très longue mais inconnue au moment de la conception. Elle peut varier de 50 à plus d'une centaine d'années soit pour des raisons structurelles soit pour des raisons sociales (Aktas et Bilec, 2012). Les futures phases de maintenance, de rénovation et de déconstruction sont inconnues : fréquence des travaux, progrès technologiques des composants et procédés (Negishi et al., 2018). Un bâtiment entretient des interactions dynamiques avec d'autres systèmes qui influencent ses

performances énergétiques et environnementales : son environnement proche (microclimat, masques proches et lointains), le climat, le réseau d'approvisionnement énergétique (mix électrique et de chaleur), et la technosphère à travers les nombreux composants et procédés impliqués durant tout son cycle de vie. Enfin, rappelons que le rôle du bâtiment est avant tout social, culturel, économique et esthétique. Il est donc constamment soumis à des décisions humaines provenant de divers acteurs : décideurs du projet, occupants, bailleurs sociaux le cas échéant, et décideurs publics au travers notamment des réglementations thermiques et environnementales. Ces décisions concernent les choix de conception, le déroulement des travaux de construction, le comportement des occupants durant l'utilisation, les choix de rénovation et la décision finale de sa déconstruction.

1.5.2.2 Incertitudes dans une perspective de cycle de vie

L'ACV appliquée à un système complexe nécessite des efforts et des ressources importantes dans la modélisation du système et de bien définir les objectifs et le champ de l'étude, par exemple au niveau des frontières du système. Par ailleurs les problématiques liées aux incertitudes prennent une place plus importante encore à cause de la multiplication des sources de variabilité et d'incertitudes épistémiques. Ces dernières sont d'autant plus importantes que la durée de vie du système est longue. Elles comprennent les incertitudes prospectives non seulement du système principal (p.ex. son vieillissement) mais aussi des systèmes en interactions possédant leur propre évolution future.

La Figure 1.22 et la Figure 1.23 recensent plusieurs sources d'incertitudes dans le cycle de vie d'un bâtiment et les facteurs incertains correspondant en ACV à partir de la revue de littérature de cette thèse (Pannier, 2017a ; Tian et al., 2018 ; de Wilde et al., 2011 ; Hoxha et al., 2017 ; Negishi et al., 2018). Plus de détails sur ces travaux sont donnés dans la section 1.5.4. Cette classification est centrée sur le point de vue du concepteur. On y distingue donc les incertitudes des choix qui lui reviennent, et les incertitudes sur lesquelles lui, les décideurs ou l'architecte n'ont pas de contrôle direct. Les choix réalisés en phase de conception influent fortement sur les impacts associés à toutes les étapes du cycle de vie du bâtiment : la forme du bâti et son architecture bioclimatique, les quantités et types de matériaux employés et les systèmes qui sont installés vont très fortement influencer les impacts de la construction, de l'utilisation, des premières rénovations et de la

fin de vie de la structure. L'incertitude liée aux choix de conception dépend de la méthode employée pour concevoir un bâtiment. Actuellement le meilleur moyen pour un concepteur de réduire cette incertitude est d'adopter une procédure d'optimisation multicritère couplée à l'ACV globale du bâtiment (Naboni et al., 2013 ; Nwodo et Anumba, 2019). Les autres sources principales d'incertitude sont les variabilités et le futur. Elles sont impossibles à contrôler en phase de conception mais peuvent seulement être mieux prises en compte à ce stade. C'est durant la phase opérationnelle du bâtiment que des stratégies de contrôle ou d'incitation peuvent être mises en place pour limiter leurs effets.

Tous les types de variabilité existent dans le cycle de vie d'un bâtiment : spatiale, temporelle, technologique et humaine. Parmi les variabilités temporelles on peut, entre autres citer la météo qui va influencer les consommations d'énergie et la production photovoltaïque, induisant des incertitudes dans les impacts de l'étape d'utilisation. Le site géographique est *a priori* déjà sélectionné en phase de conception et cet emplacement va apporter de l'incertitude liée à la variabilité spatiale comme les distances de transport des produits et des occupants, les infrastructures disponibles et leur état (p.ex. l'existence de transports en communs à proximité ou le rendement du réseau d'eau). Enfin il existe plusieurs formes de variabilités technologiques et humaines. Les premières concernent des variations dans les procédés de fabrication d'un même type de produit ou dans les procédés d'un même type de fin de vie comme par exemple le recyclage de panneau solaire photovoltaïque de première génération (incluant seulement le verre, les métaux et les plastiques) ou de deuxième génération (incluant en plus le recyclage des cellules en silicium). Cette variabilité peut être en partie liée à de la variabilité spatiale si les technologies disponibles sont limitées par l'emplacement géographique du site. En phase de construction la qualité des composants peut avoir des conséquences sur les caractéristiques thermiques des éléments de l'enveloppe et sur les caractéristiques techniques des systèmes CVC et de production. La mauvaise qualité peut affecter la durée de vie des composants et de la structure, avec des effets sur les impacts des étapes de rénovation, de déconstruction et la durée de vie du bâtiment. Parmi les variabilités humaines on retrouve la qualité des travaux réalisés en phase de chantier qui peut affecter la performance énergétique du bâtiment avec par exemple la présence de défauts qui augmentent les ponts thermiques ou l'infiltration de l'enveloppe, ou encore les déchets et

les pertes de matériaux pendant le chantier. L'incertitude liée à la qualité des travaux peut être minimisée avec la mise en place par les décideurs d'un cahier des charges strict à l'attention de l'entreprise de construction. La variabilité associée au comportement des occupants joue un rôle important dans les impacts des étapes d'utilisation (températures de chauffage ou de refroidissement, appareils, etc.) et de rénovation (fréquence et niveau de maintenance et de remplacement des composants). Des contrats de garantie de performance énergétique permettent de mieux quantifier la variabilité de la performance et d'attribuer la responsabilité de la variabilité réelle à la qualité des travaux ou aux occupants (Ligier et al., 2017). Cette solution ne s'applique néanmoins pas actuellement aux impacts environnementaux de l'utilisation. Une autre incertitude importante est allouée au propriétaire final du bâtiment qui pourra choisir de le déconstruire alors que l'état structurel ne l'exige pas. Cette variabilité peut sensiblement diminuer la durée de vie d'un bâtiment par rapport aux estimations initiales et pourrait même être la première cause de déconstruction aux États-Unis selon Aktas et Bilec (2012).

La dernière catégorie d'incertitude est liée à l'ignorance envers l'évolution future du bâtiment. On retrouve dans les sources d'incertitudes prospectives les mêmes aspects temporels identifiés par Negishi et al. (2018) dans leur méthodologie d'une ACV dynamique de bâtiment : modification de l'utilisation du bâtiment (logements versus bureaux par exemple), évolution du mix énergétique, évolution des comportements des occupants, évolutions technologiques ainsi que le changement climatique. Ces aspects prospectifs jouent un rôle important dans les impacts de l'utilisation et dans les futurs remplacements et fins de vie des composants. Le changement climatique est un des aspects prospectifs les plus importants jouant un rôle dans la consommation d'énergie et les impacts associés ainsi que sur le confort des occupants. La météo fait partie des facteurs incertains en ACV qui possède à la fois une incertitude liée à de la variabilité naturelle et une incertitude future. C'est aussi le cas du vieillissement qui est un phénomène naturel pouvant être quantifié grâce à des mesures et observations des composants et systèmes passés mais dont l'impact sur la dégradation des performances de certains composants pourra être réduit grâce à des progrès technologiques. De même, le comportement des occupants dépend aujourd'hui d'une variabilité démographique, sociale, culturelle et économique. Ces facteurs peuvent évoluer dans le temps et modifier le comportement

moyen des occupants. Peut-être que les occupants du futur seront mieux sensibilisés à leurs impacts environnementaux ou à l’inverse auront-ils plus d’appareils électriques et une plus grande consommation d’énergie.

Les travaux de la littérature dans les domaines de l’évaluation de la performance énergétique et dans l’ACV des bâtiments ont très peu abordé les incertitudes prospectives du cycle de vie des bâtiments. Dans le domaine de l’évaluation énergétique des bâtiments, les incertitudes provenant de la variabilité des occupants, de la météo et des caractéristiques des matériaux ont été les plus étudiés (Tian et al., 2018)

Type d'incertitude	Source de l'incertitude système réel	Source de l'incertitude en ACV (facteur incertain) et étape du cycle de vie concernée				Solution pour réduire ou estimer l'impact de l'incertitude
		Construction	Utilisation	Rénovation	Déconstruction	
Choix	Phase de conception	• Architecture, forme • Types et quantité de matériaux, de menuiseries et de systèmes CVC/EnR	• Bioclimatisme de l'architecture • Caractéristiques et dimensionnement des matériaux, menuiseries et systèmes CVC/EnR	Fin de vie des composants initiaux (matériaux, menuiseries, systèmes)	Système constructif (béton, ossature bois, pierre…) et procédés de fin de vie associés	L'optimisation multicritère et l'ACV permettent de faire des choix mieux éclairés
Variabilité temporelle	Météo		• Besoins de chauffage et de froid • Production photovoltaïque			• Utiliser une météo de référence • Propager la variabilité météo
	Vieillissement		• Dégradation des performances thermiques des matériaux et menuiseries • Dégradation de l'efficacité des systèmes (rendement, débit de ventilation…)	Obsolescence prématurée des composants	Durée de vie du bâtiment	• Prendre en compte la dégradation temporelle des performances • Considérer des modèles de vieillissement
	Mix énergétique (électricité)		• Impact environnemental de la consommation d'électricité			Modéliser la variabilité temporelle du mix
Variabilité spatiale	Site géographique	Transport depuis l'usine et vers la fin de vie	• Transport des occupants et des déchets • Réseau de chaleur urbain • Rendement du réseau d'eau • Albédo du sol	Transport depuis l'usine et vers la fin de vie	Transport vers la fin de vie	• Meilleure connaissance du site • ACV spatiale

Figure 1.22 – Sources d'incertitudes dans le cycle de vie réel d'un bâtiment et leur influence en ACV, partie 1

Type d'incertitude	Source de l'incertitude système réel	Source de l'incertitude en ACV (facteur incertain) et étape du cycle de vie concernée				Solution pour réduire ou estimer l'impact de l'incertitude
		Construction	Utilisation	Rénovation	Déconstruction	
Variabilité technologique et humaine	Techno-sphère	Procédés de fabrication	Procédés de traitement des déchets ménagers	Procédés de fabrication et de fin de vie	Procédés de fin de vie	•Meilleure connaissance du site • ACV spatiale
	Qualité des composants		• Caractéristiques thermiques des matériaux • Efficacité des systèmes CVC/EnR	Obsolescence prématurée des composants	Durée de vie du bâtiment	Cahier des charges et suivi de chantier
	Qualité des travaux	Pertes sur chantier	Performances de l'enveloppe (ponts th., infiltration d'air, défauts)			
	Occupants et/ou gestionnaires	Décision finale sur la conception	Usages énergétiques, d'eau, de déchets et de transport	• Fréquence et niveau de maintenance • Choix des technologies de remplacement	Déconstruction avant la fin de vie structurelle	Sensibilisation et accompagnement des acteurs
Épistémique	Évolutions futures		• Changement climatique • Évolution du mix électrique • Changements d'occupants et de comportements • Installation de nouveaux systèmes par les occupants (climatisation, stockage) • Vieillissement	• Progrès technologiques: nouveaux produits, procédés de fabrication et fin de vie • Évolution du mix électrique (procédés) • Maintenance des occupants	• Durée de vie du bâtiment • Futurs procédés de fin de vie • Évolution du mix électrique (procédés)	Considérer les aspects prospectifs dans une aide à la décision robuste

Figure 1.23 – Sources d'incertitudes dans le cycle de vie réel d'un bâtiment et leur influence en ACV, partie 2

1.5.2.3 Modélisation du bâtiment en ACV

Le modèle de cycle de vie de bâtiment permet de fournir des données de premier-plan et d'arrière-plan à l'ICV. En s'appuyant sur l'état de l'art en ACV de bâtiment présenté en section 1.3.2 et sur les travaux de Recht (2016), Roux (2016), Pannier (2017) et Vorger (2014), on peut décrire un modèle type de cycle de vie de bâtiment (Figure 1.24). Cette illustration permet de visualiser comment le modèle global est intégré dans une ACV et participe à la construction de l'ICV. Il comporte les incertitudes spécifiques au cycle de vie des bâtiments décrites précédemment, qui s'ajoutent aux incertitudes classiques en ACV présentées dans la section 1.5.1.

Des données de construction sont utilisées pour modéliser fidèlement le bâtiment : plan, composition de l'enveloppe, caractéristiques des matériaux et des composants, systèmes installés, etc. Le modèle principal de SED va fournir à l'ICV des données de consommation et de production d'énergie ainsi que les types et quantités de matériaux à partir des données de construction et du plan. Un modèle complémentaire peut fournir d'autres flux comme les consommations d'eau froide, la production de déchets ménagers et les transports. L'usage de sous-modèles permet de réduire les incertitudes liées aux différentes variabilités et d'améliorer la représentativité de l'ensemble. Ces sous-modèles sont intégrés directement ou indirectement en intégrant seulement des données préalablement générées. Par exemple, il est possible d'utiliser une année de référence composée de données réelles de la station météo la plus proche ou d'utiliser des données spatialement représentatives au niveau régional ou urbain, pré-générées par des modèles d'interpolation spatiale (p.ex. MeteoCalc), de réanalyse climatique (p.ex. ERA5) ou de microclimat (UrbClim, UrbaWind ou Envi-Met). Chacun de ces modèles comportent leurs propres incertitudes. Les systèmes énergétiques du bâtiment sont modélisés pour diminuer l'incertitude liée à la représentativité technologique. C'est par exemple le cas avec la modélisation d'un système photovoltaïque utilisant les données météo locales. Un modèle de comportement des occupants construit à partir de données sociologiques permet de fournir des scénarios d'occupation propres à une typologie socio-démographique d'occupants. Enfin, l'élargissement des frontières du système bâtiment pour considérer un

modèle du système de production électrique permet de fournir à l'ICV une description horaire du mix électrique d'arrière-plan.

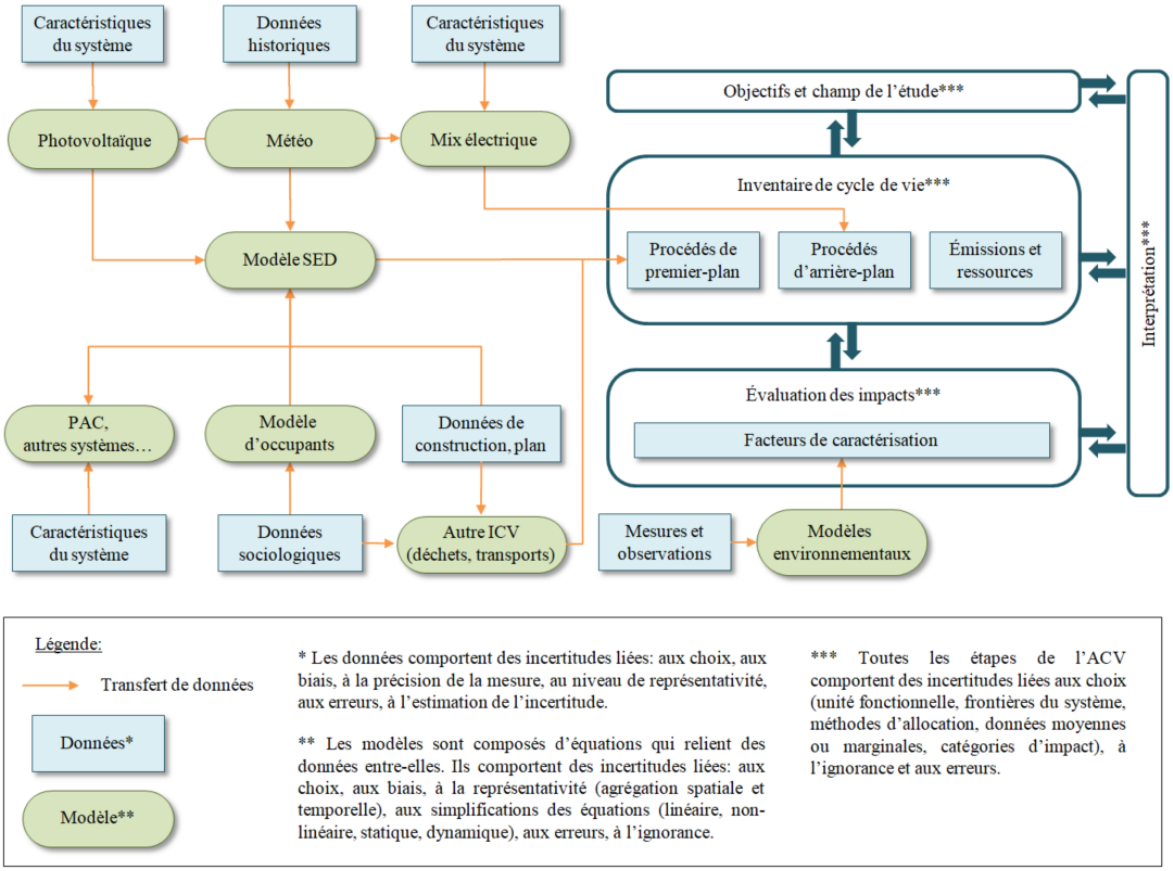


Figure 1.24 – Schéma de principe de l'ACV de bâtiment et contextualisation des types d'incertitudes selon Björklund (2002)

La multiplication des sous-modèles répond au besoin d'améliorer la représentativité du système complexe « réel » en intégrant plus précisément les interactions dynamiques entre le bâtiment et d'autres systèmes (météo, mix électrique, occupants). Chaque modèle supplémentaire complexifie le modèle global et apporte avec lui des incertitudes inhérentes à la modélisation et aux données. D'un point de vue purement pratique on peut se dire que la complexification du modèle apporte de nouvelles incertitudes. En réalité la complexification du modèle ne fait que *révéler* des incertitudes qui étaient déjà présentes dans le modèle plus simple mais qui n'étaient pas formellement visibles, accessibles et analysables à cause de cette simplicité. Cette idée peut être résumée par la citation de John

Wheeler (1992) : « We live on an island of knowledge surrounded by a sea of ignorance. As our island of knowledge grows, so does the shore of our ignorance. » Cette hausse de la complexification doit s'accompagner d'une démarche d'acceptation des incertitudes et d'un autre usage des outils de modélisation que celui d'identifier une solution unique. L'ajout de complexité rend le modèle global plus représentatif de l'état des connaissances actuelles, il élargit le panel d'incertitudes analysables et quantifiables et permet d'approfondir la compréhension d'un système dans ses aspects sensibles, ses risques ou ses possibles évolutions futures (Plevin et al., 2014). Cette démarche doit bien sûr s'accompagner de la recherche d'un équilibre entre la volonté d'obtenir une représentation la plus fidèle possible de la réalité et le niveau de complexité et la faisabilité de la modélisation (Zamagni et al., 2008).

1.5.3 Méthodes d'aide à la décision et de conception robuste

1.5.3.1 Champs d'application

Des méthodes de conception et d'aide à la décision robustes ont été développées parallèlement dans plusieurs disciplines scientifiques. On distingue les disciplines associées à la conception en ingénierie, et celles associées à l'aide à la décision pour la recherche opérationnelle, la stratégie et l'élaboration de politiques publiques. Ces deux champs proposent des méthodes similaires pour aboutir à des conceptions ou décision robustes. Elles reposent généralement sur l'évaluation des solutions candidates dans un ensemble de conditions d'incertitudes permettant le calcul d'un critère de robustesse. Les incertitudes considérées et le critère de robustesse sont définis en phase avec le problème de décision : les objectifs des décideurs, les craintes et risques, et la fiabilité du modèle d'évaluation. Cette approche peut être appliquée *a posteriori* à un ensemble de solutions pré-sélectionnées ou intégrée directement dans un processus d'optimisation robuste où le critère de robustesse va diriger la recherche vers des solutions optimales robustes. Les cadres méthodologiques des deux champs de recherche sont présentés dans la suite. Ils permettent d'obtenir une vision d'ensemble des solutions qui se présentent à notre problématique.

Prise de décision robuste

Les méthodes de prise de décision robuste (*robust decision making*), prennent leur source au sein de la RAND Corporation au début des années 1980, un influent think-tank militaire américain. La guerre des Malouines en 1982 ouvre des débats internes à la RAND entre ceux qui ne croient pas à l'utilité de la modélisation et leurs défenseurs. Les premiers voient dans cette guerre l'opportunité de prouver l'utilité des modèles en jugeant de leurs succès à prédire l'issue du conflit qui se terminera 2 mois plus tard. Les seconds rétorquent que malgré la qualité et le réalisme de leurs modèles, leur utilité réside dans la capacité à fournir de la compréhension et non une prédiction (Lempert, 2019). Aujourd'hui, le développement de cette discipline est très actif dans l'élaboration de politiques publiques, de stratégies ou de planifications qui soient robustes à des incertitudes épistémiques et des évolutions futures. On peut citer dans les domaines d'application de ces méthodes l'environnement (Guivarch et al., 2017), l'énergie (Soroudi et Amraee, 2013) ou les programmes de gestion régionale de l'eau (Kasprzyk et al., 2013). La philosophie principale derrière ces méthodes est que l'usage traditionnellement prédictif des outils de modélisation est contre-productif voire risqué en présence de fortes incertitudes épistémiques (Saltelli et al., 2015). L'usage des outils de modélisation doit donc être repensé, non plus comme un moyen de fournir de meilleures prédictions, mais comme un moyen de fournir les informations les plus utiles pour atteindre la meilleure décision (Lempert, 2019). Dans un contexte de prise de décision robuste, l'incertitude peut être considérée comme la différence entre la connaissance actuellement disponible et la connaissance dont les décideurs auraient besoin pour faire le meilleur choix (Marchau et al., 2019). Aussi appelée « prise de décision sous incertitude profonde » (*decision-making under deep uncertainty*), l'incertitude profonde correspond à une forme d'incertitude épistémique qui est rencontrée quand des experts ou les parties prenantes et décideurs ne sont pas d'accord sur (i) le contexte extérieur d'un système, (ii) le fonctionnement du système et ses conditions limites, et/ou (iii) les grandeurs d'intérêt du système d'étude et/ou leur importance relative (Lempert et al., 2003). Le décideur fait alors face à des incertitudes inévitables où, pour chacune des décisions alternatives, il existe une multitude d'issues incertaines possibles sans pouvoir leur attribuer de probabilité d'occurrence. Ce type d'incertitude est particulièrement présent lorsqu'une décision s'inscrit dans le temps

et implique une dimension prospective. Une approche recommandée par Hamarat et al. (2013) est de considérer dans l'étude tous les scénarios plausibles et tous les modèles d'évaluation disponibles sans exception, et sans désigner de modèle comme le meilleur ni de scénario comme le plus réaliste ou le plus probable.

Conception robuste en ingénierie

Dans les disciplines de l'ingénierie le terme de conception robuste est plutôt employé, le produit passant avant l'aspect décisionnel qui se déroule généralement en interne. Une conception robuste est une conception performante au regard de certaines incertitudes et d'un critère de robustesse choisi. La méthode de conception robuste la plus connue est celle de Taguchi qui consiste à tester un produit dans diverses conditions de fonctionnement grâce à un plan d'expérience puis à ajuster les paramètres de conception pour améliorer sa robustesse (Taguchi et Yokoyama, 1993). Les problèmes de conception robuste en ingénierie traitent de systèmes qui sont compliqués d'un point de vue technique mais qui ne sont pas complexes au sens d'un système ouvert et soumis à de fortes incertitudes épistémiques comme c'est le cas en ACV du bâtiment. Ainsi, les travaux dans ce domaine se concentrent principalement sur les incertitudes qui correspondent à de la variabilité et de l'imprécision dans les mesures, qui sont toutes deux traitées par une approche probabiliste. Beyer et Sendhoff (2007) soulignent le manque de travaux en optimisation robuste sous incertitudes épistémiques et recommandent même de traiter ce type d'incertitude par une approche probabiliste bien que ce ne soit pas approprié au sens de la prise de décision robuste (Herman et al., 2015).

1.5.3.2 Cadre formel de la prise de décision

Lempert et al. (2003) proposent un cadre formel qui permet d'assembler et d'organiser les informations les plus importantes au sujet d'une prise de décision. Ce cadre est appelé XLRM, acronyme des composantes suivantes :

- Leviers (L) : il s'agit des variables de décision ou des facteurs endogènes qui définissent le champ d'action du décideur ;
- Incertitudes exogènes (X) : ce sont les facteurs en dehors du contrôle du décideur mais qui peuvent avoir une influence importante dans l'issue de la décision ;

- Mesures (M) : ce sont les grandeurs d'intérêt qui serviront à classer les solutions alternatives. Elles comprennent celles pour lesquelles sont définies des objectifs et des contraintes en optimisation multicritère ;
- Relations (R) : il s'agit des modèles qui décrivent les relations entre les différents facteurs.

Un exemple de cadre XLRM est donné dans le Tableau 1.2 suivant.

Tableau 1.2 – Exemple de cadre de prise de décision XLRM

Incertitudes exogènes (X)	Leviers (L)
variabilité des occupants	forme du bâti, architecture
variabilité météo	type d'isolant
qualité des travaux	épaisseur d'isolant
vieillissement	type de fenêtre
Relations (R)	**Mesures (M)**
modèle de SED (Pleiades)	consommations d'énergie
	coût d'investissement
	confort des occupants

1.5.3.3 Critères de robustesse

On considère une sélection de solutions construites à partir des paramètres de décision (L), soumis aux incertitudes décrites dans (X). Un critère de robustesse de l'une des mesures de la performance (M) peut être calculé à partir des évaluations réalisées sur toutes les conditions incertaines possibles.

Il existe autant de définitions de la robustesse d'une solution que de mesures pour la quantifier. On distingue néanmoins trois grandes catégories de robustesse (Kwakkel et Haasnoot, 2019):

- Les mesures statistiques de la robustesse évaluent les solutions individuellement à partir de descriptions statistiques de la distribution de leurs performances. On y retrouve les indicateurs classiques de la moyenne et de l'écart-type. D'autres indicateurs combinent la moyenne et l'écart-type (somme ou fraction), néanmoins cette approche n'est pas recommandée car la moyenne et l'écart-type n'ont pas nécessairement de relation linéaire et devraient même être traitées comme deux objectifs contradictoires en optimisation robuste (Figure 1.25) (Beyer et Sendhoff, 2007). Un inconvénient de l'usage de l'écart-type est qu'il est centré sur la moyenne et combine des variations négatives et positives d'un point de vue de la performance. C'est pourquoi l'usage de moments statistiques de degré supérieur comme le coefficient d'asymétrie et le kurtosis a été exploré par (Kwakkel et al., 2016). Les mesures de maximum et de minimum se concentrent sur la pire et la meilleure performance sur un ensemble de scénarios. Ces mesures correspondent plus à une philosophie fiabiliste et conservatrice. Enfin, il existe aussi la mesure statistique du percentile.
- Les mesures de « regret » proviennent de Savage (1954) et sont comparatives. Le regret d'une solution est la différence de performance entre cette solution dans un scénario donné et la performance de la meilleure solution dans ce même scénario. Une solution robuste est alors une solution qui minimise sa valeur maximale de regret (*minimax regret*) sur tous les scénarios. Des variantes de ce critère choisissent une valeur de référence au lieu de la meilleure performance sur chacun des scénarios.
- Les mesures de seuil de « suffisfaisance » (*satisficing*) dont la dénomination est un mot-valise combinant *satisfying* (satisfaisant) et *sufficing* (suffisant). L'idée, qui provient de Simon (1969), est que les décideurs peuvent se satisfaire d'une solution qui leur parait suffisamment bonne sans atteindre la solution optimale. Les mesures de « suffisfaisance » sont basées sur la définition d'un seuil de performance minimal. Une solution est d'autant plus robuste qu'il y a de scénarios où ce seuil est respecté.

Les différents critères d'incertitudes sont classés dans le Tableau 1.3.

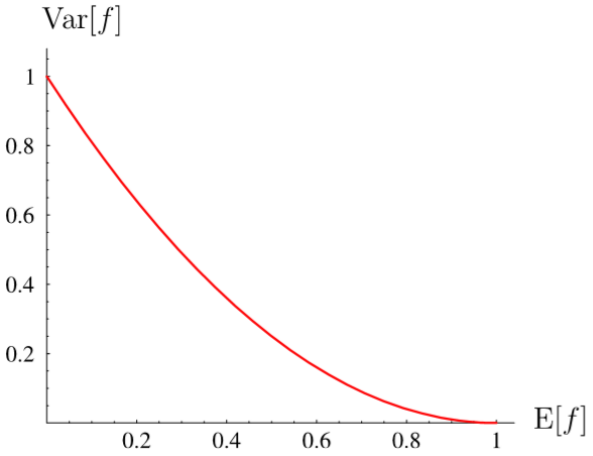


Figure 1.25 – Front de Pareto d'une optimisation multicritère avec compromis entre variance (écart-type) et espérance (moyenne) (Beyer et Sendhoff, 2007)

Tableau 1.3 – Classification des critères de robustesse, adapté de (Kwakkel et Haasnoot, 2019)

		Caractérisation de la performance de solutions alternatives	
		Comparaison de variantes	Performance individuelle
Caractérisation de la performance sur les incertitudes/scénarios	Seuil		Suffisfaisance : fraction de scénarios qui respectent le seuil de performance
	Description statistique	Minimax regret Min regret, référence scénario de base	Moments de la distribution (moyenne, écart-type, etc.), minimum, maximum, percentile, ratio moyenne/écart-type

Le choix du critère a son importance: Herman et al. (2015) a montré que le classement de solutions selon leur robustesse pouvait changer avec le critère considéré. Le choix d'un critère de robustesse apporte ainsi une nouvelle source d'incertitude dans la prise de décision. Par ailleurs ces critères de robustesse sont applicables dans les approches stochastiques et déterministes mais dans cette dernière les mesures basées sur la statistique perdent en pertinence. C'est le cas du percentile qui a valeur de risque ou de garantie seulement s'il est appliqué à des distributions d'incertitudes stochastiques suffisamment représentatives.

1.5.3.4 Optimisation multicritère robuste

L'optimisation robuste répond au besoin d'identifier des solutions aussi performantes que possible malgré les incertitudes considérées dans le modèle, et qui sont optimales et fonctionnelles au regard de ces incertitudes (Kruisselbrink, 2012). On distingue à ce stade deux approches :

- L'évaluation *a posteriori* de la robustesse de solutions d'un front de Pareto issu d'une optimisation multicritère ;
- L'optimisation multicritère robuste.

La première approche, qui est parfois abusivement dénommée « optimisation multicritère robuste » dans certains travaux de la littérature revient à l'idée « de réaliser une optimisation multicritère puis d'évaluer la robustesse des solutions optimales ». Cette approche est un bon moyen de départager les solutions d'un front de Pareto en sélectionnant celle qui est plus robuste. En revanche ce n'est pas un bon moyen pour identifier des solutions robustes optimales, la seule approche sûre est l'optimisation multicritère robuste (Beyer et Sendhoff, 2007).

Le fonctionnement de l'optimisation robuste repose sur la propagation d'incertitudes dans l'évaluation individuelle de chaque solution explorée (Deb et Gupta, 2006). Cette approche peut être vue comme un « *stress test* » d'une solution dont une performance est évaluée sur chaque condition incertaine possible pour finalement calculer sa valeur sur le critère de robustesse qui a été choisi. Les grandeurs d'intérêt robustes qui sont évaluées peuvent aussi bien être utilisées dans une fonction objectif que dans une contrainte.

Cette méthode est très efficace pour converger vers des solutions robustes et optimales. Néanmoins elle pose plusieurs difficultés. La première est le coût calculatoire qui peut largement exploser selon le nombre d'incertitudes considérées et le type de propagation d'incertitude. Dans une approche probabiliste les incertitudes sont propagées avec une méthode de Monte-Carlo comptant entre 100 et plusieurs milliers d'évaluations ce qui signifie une multiplication des temps de calculs par ce même nombre en comparaison d'une optimisation multicritère classique. Sachant qu'une optimisation multicritère de bâtiment peut durer 9h, une optimisation multicritère robuste basée sur 100 échantillons de Monte-Carlo durerait 38 jours ce qui serait peu envisageable. Dans une approche déterministe basée sur un ensemble fini de scénarios les temps de calcul dépendent du nombre de scénarios explorés. Un autre aspect à considérer dans une application en ACV de bâtiment est que chaque facteur incertain ne mobilise pas forcément les mêmes moteurs de calcul. Ainsi, comme précédemment décrit en section 1.4.2.2, les facteurs incertains qui nécessitent de refaire des calculs de type SED (p.ex. des scénarios d'occupants) vont contribuer beaucoup plus largement à la hausse des temps de calcul que des facteurs incertains qui agissent seulement au niveau du moteur de calcul de l'ICV (p.ex. le mix électrique), qui est individuellement beaucoup plus rapide.

Un autre inconvénient de l'optimisation robuste est la complexité qu'elle peut apporter en augmentant le nombre de fonctions objectif. Selon les besoins, une fonction objectif robuste peut venir s'ajouter à un ensemble de fonctions objectif « classiques ». Par ailleurs, comme l'a indiqué Beyer et Sendhoff (2007), la moyenne d'une distribution et son écart-type sont deux critères contradictoires qui devraient donc représenter deux fonction objectif robustes pour procéder à une recherche la moins biaisée possible. Tout cela nous amène aux problématiques de l'optimisation d'un grand nombre d'objectifs exposés en section 1.4.2.3. Là encore, les contraintes opérationnelles imposent de trouver un compromis entre temps de calcul acceptable, complexité et exhaustivité de la méthode. Ce compromis sera étudié et décrit dans la suite de cette thèse.

1.5.4 Applications des méthodes aux bâtiments

Cette sous-section présentent quelques travaux de la littérature en incertitudes appliqués au secteur du bâtiment d'un point de vue du cycle de vie ou de la prospective, en évaluation de la robustesse *a posteriori*, et en optimisation robuste.

1.5.4.1 Travaux en incertitudes dans le secteur du bâtiment

Cette sous-section s'appuie en grande partie sur la revue de la littérature en incertitudes dans l'énergétique du bâtiment de Tian et al. (2018) qui ont rassemblé plus de 200 études. Les incertitudes peuvent être traitées de deux manières en énergétique du bâtiment : par des méthodes de propagation ou par des méthodes inverses, qui cherchent à calibrer un modèle de SED d'un bâtiment existant à partir de mesures réelles. On s'intéresse exclusivement à la propagation d'incertitude qui correspond le mieux à une phase de conception où le bâtiment n'existe pas encore. Tout comme en ACV la méthode de propagation la plus populaire dans la littérature est la méthode de Monte-Carlo qui est simple et directe à utiliser (Tian et al., 2018). En évaluation de la performance énergétique, les frontières du système sont plus restreintes qu'en ACV du bâtiment puisqu'elles correspondent aux échanges énergétiques qui traversent seulement les frontières physiques du bâti. Le système est donc « fermé » ce qui permet de comparer et valider les résultats d'une modélisation SED avec des mesures réelles (Leconte, 2010 ; Munaretto et al., 2017). Les sources d'incertitudes dans la performance énergétique d'un bâtiment proviennent de quatre aspects principaux : la météo, l'enveloppe, les systèmes CVC et le comportement des occupants.

La météo comprend la variabilité naturelle et la variabilité future due au changement climatique. La météo comprend entre autres des paramètres de température extérieure, de rayonnement solaire, d'humidité, de vitesse de vent, de précipitation qui influencent les performances énergétiques et le confort des occupants (de Wilde et al., 2011 ; Tian et Wilde, 2011 ; Wang et al., 2012 ; Hong et al., 2013 ; Nik, 2016 ; Farah et al., 2019 ; A. Moazami et al., 2019). Les conditions météo futures peuvent également influencer le fonctionnement des systèmes CVC et le vieillissement des composants du bâtiment (de Wilde et Coley, 2012). Herrera et al. (2017) réalisent une revue de la littérature complète

sur les types de données météo historiques et synthétiques qui peuvent être utilisées en SED du bâtiment pour propager ces variabilités.

Les sources d'incertitudes dans l'enveloppe du bâtiment peuvent provenir d'erreurs de mesures, de défauts du chantier ou dans la qualité des composants, et de phénomènes naturels comme l'humidité, la température et le vieillissement. Elles concernent les propriétés thermiques de l'enveloppe (conductivité, densité, coefficient d'isolation des fenêtres, chaleur spécifique, etc.), les propriétés surfaciques (absorptivité, émissivité, réflectivité du sol et des parois, coefficient de transfert thermique convectif), le taux d'infiltration d'air et les ponts thermiques (Tian et al., 2018 ; Hopfe et Hensen, 2011 ; Thevenard et Haddad, 2006 ; Breesch et Janssens, 2010). Aïssani et al. (2016) évaluent expérimentalement les effets de défauts de chantier sur la conductivité thermique d'un isolant. Ils trouvent également que ces défauts peuvent augmenter jusqu'à +75 % les besoins thermiques et le vieillissement naturel jusqu'à +10 % après 15 ans.

Les incertitudes associées aux systèmes CVC et de production d'énergie renouvelable proviennent de défauts, d'erreur de dimensionnement, du vieillissement, du niveau de maintenance et du système de régulation. Ces sources d'incertitudes vont principalement jouer sur l'efficacité énergétique du système mais aussi sur les risques d'une incapacité à répondre à la demande thermique, de défaillance ou de panne (de Wilde et al., 2011 ; Jordan et Kurtz, 2013 ; Huang et al., 2018a). Eleftheriadis et Hamdy (2018) étudient l'effet combiné de la dégradation des isolants et des systèmes. Ils observent entre +30 % et +100 % d'augmentation de la consommation annuelle d'énergie primaire au bout de 20 ans selon les scénarios de dégradation.

Enfin, le comportement des occupants est une source majeure d'incertitudes qui peut apporter de 30 % à 50 % d'écarts dans la performance énergétique (Eguaras-Martínez et al., 2014 ; Vorger, 2014 ; Wang et al., 2012 ; Hopfe et Hensen, 2011 ; Bucking et al., 2014). Le comportement des occupants est décrit par des scénarios sur les températures de chauffage et de climatisation, le taux de présence, l'utilisation d'appareils et l'éclairage. L'usage d'un modèle d'occupation permet de générer des scénarios plus fidèles à la réalité et de propager des incertitudes stochastiques (Vorger, 2014 ; Ligier, 2017).

Plusieurs travaux s'intéressent à l'évaluation énergétique prospective du bâtiment sous le nom de performance du cycle de vie (« life cycle performance ») ou d'études longitudinales. Parmi eux, certains adoptent la méthode de Monte-Carlo du second ordre qui permet de propager à la fois des incertitudes stochastiques et épistémiques. de Wilde et Tian (2009) l'utilisent pour évaluer la sensibilité des besoins de chauffage, de froid et du confort thermiques à des incertitudes à la fois stochastiques et prospectives (meilleures technologies de remplacement) sur les caractéristiques thermiques de l'enveloppe et selon plusieurs évolutions météo sur les années 2020, 2050 et 2080. Ils montrent des tendances à la baisse pour les besoins de chauffage et à la hausse pour les besoins de froid et le nombre d'heure d'inconfort. de Wilde et al. (2011) réalisent une autre étude similaire mais cette fois-ci en intégrant un modèle de dégradation des systèmes CVC, des scénarios de maintenances et des évolutions climatiques.

Concernant les incertitudes en ACV de bâtiment on se réfère principalement à la thèse de Pannier (2017) qui analyse de nombreuses sources d'incertitudes simultanément. Ses résultats mettent en avant l'influence de deux facteurs propres à l'ACV qui sont le choix de mix électrique et la durée de vie du bâtiment. Les autres paramètres influents ont également été identifiés dans la littérature en énergétique du bâtiment : la température de consigne, la température extérieure et les ponts thermiques. D'autres travaux d'analyse de sensibilité étudient l'influence des incertitudes de manière focalisée sur les matériaux de construction (Hoxha et al. (2017)) ou les incertitudes de l'étape de rénovation (Morales et al., 2020).

La seule approche prospective en ACV de bâtiment est proposée par Roux et al. (2016) (décrite en section 1.3.2.4), qui intègre des scénarios d'évolutions du mix électrique et de la météo en ACV de bâtiment.

1.5.4.2 Travaux en optimisation robuste

La première étude identifiée en optimisation multicritère robuste est celle de Hopfe et al. (2012). Ils considèrent des incertitudes probabilistes sur la conception du bâtiment : sur l'épaisseur de béton, sur la conductivité de l'isolant du plancher bas, sur la conductivité du bitume de la toiture, sur le taux d'infiltration et sur le type de vitrage, avec comme grandeurs d'intérêt la consommation d'énergie annuelle et le taux d'inconfort. Une

propagation de Monte-Carlo de cinquante tirages est réalisée pour chaque solution explorée par un algorithme évolutionnaire. La performance de référence d'une solution est calculée avec un modèle de SED et les perturbations sont calculées avec un méta-modèle de Krigeage pour réduire les temps de calcul. Plusieurs fonctions objectif robustes sont testées : minimisation de l'écart entre la moyenne des consommations incertaines et la consommation de référence, et minimisation de la consommation d'énergie maximale (*minmax*).

Nix et al. (2015) proposent une approche en deux étapes où un métamodèle est d'abord entraîné puis utilisé pour évaluer les individus dans une optimisation multicritère robuste avec l'algorithme NSGA-II. Des incertitudes stochastiques concernent : le nombre d'occupant, la température de consigne de la climatisation, la température de consigne de fermeture des stores et le taux moyen de PM2.5 à l'extérieur. Les deux fonctions objectifs robustes sont la minimisation de critères de robustesse sur la consommation d'énergie et sur un facteur d'agrégation de l'inconfort chaud, l'inconfort froid et du taux de particules fines émises (PM2.5). Le critère de robustesse considéré est la somme de la moyenne et de l'écart-type des distributions après échantillonnage par hypercube latin (LHS).

Kotireddy et al. (2018b) proposent une méthode d'optimisation multicritère robuste avec propagation d'incertitudes déterministes dans un algorithme génétique. Les paramètres incertains concernent les occupants et leurs usages ainsi que des conditions météo actuelles et futures. Pour réduire le coût calculatoire, le nombre initial de 29160 scénarios d'évaluation possibles est réduit à 512 en sélectionnant uniquement les scénarios extrêmes tout en gardant la même représentativité. Pour réduire encore le nombre de scénarios d'évaluation un échantillonnage par hypercube latin uniforme (ULH) permet d'identifier un échantillon minimal de 100 scénarios représentatifs. Les auteurs optimisent également les paramètres de l'algorithme d'optimisation pour améliorer la convergence et réduire les coûts calculatoires. Ils évaluent deux critères de robustesse sur l'émission de CO_2 (minmax et minmax regret) et un deuxième critère de coût de construction.

Huang et al. (2018a) proposent une optimisation monocritère robuste basée sur une méthode de Monte-Carlo du second-ordre et une approche en cycle de vie de la performance d'un BZE. Des taux de dégradation annuelle de la performance des systèmes

CVC et de production d'énergie sont propagés tout au long du cycle de vie, puis pour chaque année une propagation d'incertitudes stochastique sur des caractéristiques de l'occupation, de la météo et des systèmes est effectuée. L'optimisation ne minimise que le coût de cycle de vie mais impose des contraintes de performance énergétique. Ils identifient des solutions qui ont un coût optimal entre une augmentation des dépenses opérationnelles due à la dégradation des systèmes et un coût de maintenance pour maintenir la performance et le confort. Par ailleurs, le bilan annuel initialement de 0 kWh/m²/an la première année passe à 30 kWh/m²/an au bout de 7 ans de fonctionnement.

Moazami et al. (2019) proposent une optimisation multicritère robuste pour aboutir à des solutions peu sensibles au changement climatique. Trois années météo de référence sont sélectionnées : une année de référence actuelle, une année extrême chaude et une année extrême froide. Chaque solution explorée par l'algorithme d'optimisation est évaluée sur ces trois scénarios météo. Les auteurs définissent deux fonctions objectif qui minimisent à la fois la consommation d'énergie « moyenne » (celle sur l'année météo de référence) et la variation de la consommation d'énergie sur l'ensemble des scénarios. L'approche est cohérente avec la notion de robustesse de Taguchi (Taguchi et Yokoyama, 1993 ; Beyer et Sendhoff, 2007).

Li et Wang (2020) proposent une optimisation pseudo-multicritère robuste « coordonnée » de bâtiment zéro-énergie qui se passe en deux étapes : d'abord une optimisation de l'enveloppe puis une optimisation des systèmes. Un algorithme génétique est employé. Plusieurs critères sont agrégés en une seule fonction objectif à minimiser qui comprend le coût de cycle de vie, les besoins de froids non assurés dans l'année et un coefficient de dépendance au réseau. L'espace de décision comprend des paramètres sur l'enveloppe (orientation, profondeur de casquette, ratio de surface vitrée, etc.) et sur le dimensionnement des systèmes CVC, de production d'énergie et de stockage. Les incertitudes concernent le taux d'infiltration, des paramètres d'occupation (taux d'occupant, éclairage et appareils électriques) et la variabilité météo qui sont décrits par des distributions de probabilité. Les auteurs emploient une méthode pour représenter chaque paramètre incertain par deux valeurs les plus représentatives de sa distribution (« 2-point estimate »), ce qui permet de réduire le nombre de tirages à 6 au lieu de 60 avec un

échantillonage de type LHS. Le critère de robustesse est la moyenne d'une grandeur d'intérêt.

Conclusion du chapitre 1

Ce chapitre a permis d'établir le cadre et les bases de réflexions de cette thèse en vue de développer une méthode d'optimisation multicritère robuste pour l'écoconception de des bâtiments zéro-énergie.

Le bâtiment est un système complexe dont le cycle de vie futur est essentiellement inconnu pour le concepteur. Les sources d'incertitudes épistémiques ne peuvent pas être analysées avec des méthodes de propagation stochastiques classiques mais devraient tout de même être prises en compte dans une aide à la décision afin d'en améliorer la fiabilité. Dans un contexte de prise de décision robuste, l'usage prédictif des outils de modélisation est abandonné au profit d'un usage exploratoire qui couvre le plus de conditions futures possibles pour apporter une compréhension utile au décideur. Le rapprochement des récents développements en ACV dynamique du bâtiment, avec ceux de l'ACV prospective et de la prise de décision robuste, semble être une voie particulièrement adaptée pour explorer une diversité de cycles de vie possibles d'une solution de conception.

La présentation de plusieurs travaux en optimisation robuste de bâtiment s'est voulu la plus complète possible au moment de ce manuscrit et montre que ce sujet est encore émergeant dans la littérature. Aucune application de l'optimisation robuste multicritère avec l'ACV de bâtiment n'a été identifiée. Il est toutefois intéressant de constater la diversité des approches employées dans ces méthodes, concernant le choix des incertitudes à explorer, les grandeurs d'intérêts, les critères de robustesse et les stratégies employées pour réduire des coûts calculatoires, qui sont inévitablement importants. Cette problématique des coûts calculatoires est prégnante et contraint fortement une exploration exhaustive des incertitudes. Chaque évaluation par le modèle de SED compte et doit être minimisée, tout en s'assurant d'évaluer un critère de robustesse suffisamment représentatif. Ainsi, la propagation d'incertitudes par échantillonnage de Monte-Carlo sera écartée de ces travaux de thèse car elle est impraticable au sein d'une optimisation robuste avec la puissance de calcul d'un ordinateur de bureau.

En dehors des incertitudes propres au cycle de vie de bâtiment, la question de la robustesse repose aussi sur des incertitudes plus générales de l'ACV comme la qualité des données d'inventaire et le choix des méthodes de caractérisation utilisées. La bonne convergence de l'algorithme d'optimisation multicritère est également un critère qui peut jouer sur la qualité des solutions « robustes » qui auront été identifiées.

2 DÉVELOPPEMENTS EN ACV ET EN OPTIMISATION MULTICRITÈRE

Ce chapitre présente les outils de SED, d'ACV, de modélisation du système électrique et d'optimisation multicritère utilisés. Plusieurs améliorations sont apportées à la démarche initiale de l'optimisation multicritère héritée des travaux de thèse de Recht (2016) et de Rivallain (2013). Elles concernent notamment la qualité des données d'inventaire et l'adoption de méthodes de caractérisation plus récentes en ACV, ainsi que la modification de la méthode d'échantillonnage de la population initiale dans l'algorithme d'optimisation multicritère. Enfin, le cas d'étude est présenté ainsi que les résultats de sa simulation énergétique dynamique et de son analyse de cycle de vie.

2.1 Principaux outils utilisés

2.1.1 Simulation énergétique dynamique avec Pleiades+Comfie

2.1.1.1 Principes de calcul

Les performances énergétiques d'un bâtiment sont évaluées à l'aide de l'outil de simulation énergétique dynamique (SED) Pleiades+Comfie (Peuportier et Blanc-Sommereux, 1990). L'usage d'un modèle de SED permet d'évaluer précisement la consommation énergétique d'un bâtiment durant une année-type, améliorant ainsi la qualité de l'évaluation des impacts environnementaux de l'étape d'utilisation d'un bâtiment en ACV. La suite logicielle Pleiades est conçu spécifiquement pour permettre un chaînage entre les calculs de SED, d'ACV et leur intégration dans un algorithme d'optimisation multicritère avec AMAPOLA. Pleaides+Comfie est utilisé en bureaux d'étude et par les architectes dans l'étude de conception bioclimatique et pour évaluer le confort thermique des occupants. Le modèle est basé sur la notion de zone thermique dont la température est considérée homogène. La température de la zone est obtenue en discrétisant les parois en volumes finis et en considérant le volume intérieur comme une maille, puis un bilan thermique est effectué sur l'ensemble des mailles en prenant en compte les phénomènes non stationnaires et les sollicitations.

Le bilan thermique sur chaque maille prend la forme suivante :

$$C_m \frac{dT_m}{dt} = \dot{Q}_g - \dot{Q}_p \qquad \textbf{(2.1)}$$

avec

- C_m la capacité thermique de la maille ;
- T_m la température de la maille ;
- $\dot{Q}_g$ les gains comprenant les apports solaires et internes, ainsi que les puissances de chauffage ou de refroidissement des équipements ;
- $\dot{Q}_p$ les pertes dues à la ventilation et aux transferts thermiques par conduction, convection, rayonnement.

Certains phénomènes non stationnaires (ouverture d'un volet) ou non linéaires (mouvement d'air) sont pris en compte dans un vecteur des sollicitations noté U ce qui permet d'écrire les équations (2.1) sous la forme d'un système d'équations linéaires. En répétant ce bilan pour chaque maille de la zone considérée et en ajoutant une équation de sortie, l'ensemble des équations peut ainsi être représenté sous la forme d'un système linéaire continu et invariant :

$$\begin{cases} C\dot{T}(t) = AT(t) + EU(t) \\ Y(t) = JT(t) + GU(t) \end{cases} \quad \textbf{(2.2)}$$

avec

- T le champ discrétisé des températures ;
- C la matrice diagonale des capacités thermiques ;
- U le vecteur des sollicitations (comprenant les paramètres climatiques, le chauffage, etc.) ;
- A la matrice d'état ou matrice des termes d'échange entre mailles ;
- E la matrice de commande ou matrice des termes d'échange entre mailles et sollicitations ;
- J la matrice d'observation ou matrice reliant les sorties aux températures des mailles ;
- G la matrice d'action directe ou matrice reliant les sorties aux sollicitations ;
- Y le vecteur des sorties (ici la température intérieure de la zone prenant en compte l'air et la température des surfaces).

Une méthode de réduction modale est appliquée à ce système pour rendre sa résolution plus rapide tout en conservant la précision du modèle détaillé. Sa simulation nécessite de connaître les sollicitations telles que les émissions de chaleur par les occupants et les équipements, la température extérieure et le rayonnement solaire. Pour une présentation complète et détaillée des calculs, le lecteur peut se référer au chapitre 2 de la thèse de Robillart (2015).

Les résultats fournis par le modèle ont été validés à l'aide de données de mesures réelles ; ils ont montré une bonne fiabilité du modèle avec des température simulées présentant des écarts avec les mesures réelles ne dépassant pas 0,83 °C (Peuportier, 1993 ; Recht et al., 2014). Les intercomparaisons des résultats de plusieurs logiciels de simulation entre eux ont montré des résultats globalement proches entre les outils (Brasselet et al., 1993 ; Judkoff et Neymark, 1995 ; Peuportier, 2005 ; Brun et al., 2009).

2.1.1.2 Utilisation du modèle

La création d'un projet de bâtiment dans Pleiades+Comfie comprend la saisie des éléments suivants :

- Les informations du site qui comprend la météo locale, l'horizon, les masques proches et l'orientation du bâtiment ;
- Le plan du bâti, la composition en matériaux des parois, l'emplacement des menuiseries et des ponts thermiques ;
- La définition de zones thermiques puis dans chaque zone des scénarios horaires de consigne de température, d'occupation, d'apports internes des appareils, de ventilation… Des modèles stochastiques peuvent être utilisés pour générer des scénarios d'occupation plus représentatifs de la réalité (Vorger, 2014).
- Les systèmes CVC et de production d'énergie : chauffe-eau, pompe à chaleur, système photovoltaïque, système solaire thermique, etc ; ainsi que les émetteurs de chaleur et de froid.

Le temps de calcul d'une simulation peut durer de quelques secondes à quelques minutes selon la taille du bâtiment étudié et son nombre de zones thermiques, chaque zone supplémentaire complexifiant les calculs présentés précédemment.

2.1.2 Analyse de cycle de vie avec Pleiades ACV EQUER

EQUER, ou Pleiades ACV dans sa version commerciale, est l'outil d'ACV du bâtiment utilisé dans cette thèse. Il a été développé spécifiquement pour tirer profit des calculs réalisés en SED avec Pleiades+Comfie et assure donc une évaluation plus fiable

des impacts environnementaux de la consommation d'énergie d'un projet de bâtiment. Les données du projet saisies dans Pleiades et les besoins ou consommations énergétiques calculés par Comfie sont transmises à EQUER afin de construire l'inventaire de cycle vie, en particulier à partir des quantitatifs de matériaux et des consommations d'énergie. L'utilisateur peut ensuite saisir des informations complémentaires :

- **Construction, rénovation et déconstruction :** l'affectation de fiches d'impacts environnementaux associée à la fabrication et à la fin de vie de chaque élément du bâtiment ; la durée de vie des éléments à l'issue de laquelle ils seront remplacés à l'identique ; la quantité de pertes sur chantier qui vont être compensées par un surplus de matériaux ; les distances de transport entre les usines et le site, et entre le site et les centres de traitement des déchets ; la durée de vie du bâtiment.
- **Utilisation :** les systèmes utilisés pour fournir chauffage, climatisation et ECS et leur consommation (s'ils n'ont pas été renseignés dans Pleiades+Comfie) ; la composition du mix annuel d'électricité ou l'usage du mix moyen par usage de (Herfray et Peuportier, 2012) ; la consommation journalière d'eau ; les déchets ménagers et les transports des occupants s'ils sont inclus à l'intérieur des frontières du système.
- **Quartier :** il possible de saisir des informations à l'échelle du quartier telles que les empreintes au sol (espace vert, voirie, etc.), les réseaux et certains usages (éclairage, arrosage...).

Les temps de calculs sont très courts car il s'agit d'opérations d'addition et de multiplication simples. D'autre part, le cycle de vie considéré est statique d'un point de vue inter-annuel, les résultats de SED d'une seule année-type sont utilisés pour représenter chaque année du cycle de vie du bâtiment ce qui simplifie grandement les calculs.

La fiabilité d'EQUER a été étudiée par inter-comparaison avec d'autres logiciels dans plusieurs projets de recherche (Peuportier et al., 2004 ; Salmon et al., 2011 ; Pannier, 2014). Les résultats ont montré une bonne reproductibilité générale mais que des écarts pouvaient provenir des sources de données d'inventaire et de différences méthodologiques.

2.1.2.1 Données environnementales

Au démarrage de la thèse, les fiches environnementales sont construites à partir de la base de données d'inventaire *ecoinvent v2.2* (Frischknecht et al., 2007). Cette base de données internationale contient plus de 30 000 activités qui couvrent toutes sortes de procédés industriels dans l'énergie, la construction, l'agronomie, les transports, etc. Elle couvre également plusieurs milliers de substances et ressources qui permettent une bonne couverture des différentes catégories d'impact. Pour les produits fabriqués en France mais dont il n'existe pas de données d'inventaire localisées en France dans ecoinvent, une procédure de contextualisation est appliquée dans EQUER en remplaçant le mix électrique d'origine (généralement l'Europe ou la Suisse) par le mix électrique français. Cette approche se base sur l'hypothèse qu'à un niveau d'agrégation national, les procédés industriels génériques sont équivalents d'un pays à l'autre et que seul change le mix de production d'électricité.

Les fiches environnementales d'EQUER expriment des impacts sur 12 indicateurs environnementaux sélectionnés dans le cadre d'un projet européen (Peuportier et Putzeys, 2005). Ces indicateurs et leurs méthodes de caractérisation sont détaillés dans le Tableau 2.1. Les méthodes proviennent de IPCC 2007 (Core Writing Team et al., 2007), CML 2001 (Guinée, 2002), Eco-Indicator 99 (Goedkoop et Spriensma, 2001) et CED (*Cumulative Energy Demande*) pour la quantification de l'énergie primaire (Frischknecht et al., 2007).

La description des catégories d'impact de ces indicateurs sont données en Annexe B.

Tableau 2.1 – Indicateurs d'impact et méthodes de caractérisation d'EQUER au démarrage de la thèse

n°	Indicateur	Méthodes	Unité	Type
1	Effet de serre (100 ans)	IPCC 2001	kg CO_2 eq.	midpoint
2	Acidification	CML 2001	kg SO_2 eq.	midpoint
3	Demande cumulative d'énergie	CED	MJ	midpoint
4	Eau utilisée	EQUER	L	midpoint
5	Déchets produits	EQUER	kg	midpoint
6	Ressources	CML 2001	kg d'antimoine eq.	midpoint
7	Eutrophisation	CML 2001	kg PO_4 eq.	midpoint
8	Production d'ozone photochimique	CML 2001	kg d'éthylène eq.	midpoint
9	Écotoxicité	EI99	PDF.m².an	endpoint
10	Déchets radioactifs	EQUER	m^3	midpoint
11	Dommage à la santé	EI99	DALYs	endpoint
12	Odeur	CML 2001	m^3 air	midpoint

2.1.2.2 Hypothèses méthodologiques

Les différences méthodologiques entre les différents outils d'ACV concernent entre autres la façon dont est compté l'impact du bois (carbone biogénique), l'export de production photovoltaïque et les hypothèses de coupure et de substitution en fin de vie. L'impact de l'émission de CO_2 biogénique, provenant de la combustion et de la décomposition du bois est parfois compté nul avec en même temps un impact nul associée à la capacité de stockage de carbone du bois pendant sa croissance. Dans EQUER le carbone biogénique du bois de forêt certifiée est compté à la fois lors de la croissance du bois car la certification exige de replanter les arbres coupés (avec un impact climatique

compté négatif) et dans ses émissions de fin de vie. Pour le bois non certifié l'absorption de CO_2 lors de la photosynthèse n'est pas compté dans les frontières du système puisqu'il n'est pas certain qu'un arbre soit replanté, seul le carbone biogénique émis éventuellement en fin de vie est comptabilisé, ce qui favorise l'utilisation de bois issu de forêt gérée durablement. Néanmoins, la question des impacts du bois reste un sujet encore mal modélisé notamment en ce qui concerne les problématiques de déplacement des usages des sols lors de l'utilisation de bois certifié.

Le recyclage est compté avec une substitution de ressource primaire dans EQUER mais cette fois en appliquant la règle de 50/50 jusqu'à présent recommandée par le guide PEF « *Product Environmental Footprint* » (Manfredi et al., 2012). Dans cette approche le bénéfice de la substitution est attribué à 50 % au recycleur et 50 % à l'utilisateur du produit recyclé. Cette règle permet de favoriser à la fois le recyclage et l'emploi de matériau recyclé tout en évitant le double comptage. La méthode a été critiquée pour son approche simplifiée et certains préconisent d'adapter les % en fonction des matériaux[11]. La méthode 50/50 vise à promouvoir un équilibre entre l'offre et la demande de matières premières secondaires, les recherches se poursuivent donc sur cet aspect de modélisation.

Dans une approche du bâtiment seul, son emprise n'est pas prise en compte dans l'ICV à cause du manque d'indicateurs environnementaux concernant l'occupation et la transformation des sols. Dans une approche quartier, cet aspect est pris en compte.

2.1.3 Modèle de système électrique dynamique

Le modèle du système électrique développé par Roux (2016) est intégré à l'ACV de bâtiment en fournissant des données horaires du mix électrique pour une évaluation plus réaliste des impacts de l'usage d'électricité. Ce modèle génère des données de mix électrique cohérentes avec les données météorologiques utilisée dans la SED de bâtiment puisqu'il se base sur les mêmes données climatiques (par exemple celles de la RT2012).

[11] https://lca-net.com/blog/harnessing-the-end-of-life-formula/

2.1.3.1 Fonctionnement général du modèle

Pour une description détaillée du fonctionnement du modèle, les lecteurs peuvent se référer à la thèse de Roux (2016). Une description simplifiée du modèle est donnée dans la suite et illustré en Figure 2.1. Trois sous-parties principales composent ce modèle : la demande nationale en électricité, les productions fatales et les productions modulables.

La demande nationale en électricité est la somme de la consommation nationale, des exportations et de la consommation des stations de pompage (STEP) soustrait des importations. La modélisation des échanges aux frontières (imports et exports) est réalisée par des réseaux de neurones artificiels entrainés par des données d'entrée concernant la disponibilité nucléaire, la demande résiduelle nationale (consommation nationale - productions fatales), les productions éoliennes et PV, les températures nationales et la disponibilité de l'export.

Les productions fatales sont celles qu'on ne peut pas piloter et planifier à l'échelle nationale. Elles sont constituées de l'hydraulique au fil de l'eau, une partie de l'hydraulique éclusée, la production éolienne, la production PV, le thermique renouvelable (biogaz, cogénération bois, incinération d'ordure ménagères) et de la cogénération gaz et fioul. Les productions fatales sont calculées à partir de la météo et de données historiques de facteurs de charges.

Les productions modulables couvrent la demande résiduelle une fois les productions fatales soustraites. Elles sont pilotables à l'échelle nationale et incluent : les centrales nucléaires, l'hydraulique de lac, une partie de l'hydraulique éclusée, les centrales à gaz et charbon, le turbinage des STEP ainsi que les centrales au fioul. Des coûts de fonctionnement et des contraintes de rampes sont assignées à chaque technologie de production modulable. Leur production à chaque heure est déterminée par une optimisation qui cherche à satisfaire la demande résiduelle nationale (consommation nationale + export + pompage – production fatale – import) au moindre coût et au respect des contraintes de fonctionnement.

Les temps de calculs sont de l'ordre de quelques secondes, ce qui provient principalement de l'optimisation des productions modulables.

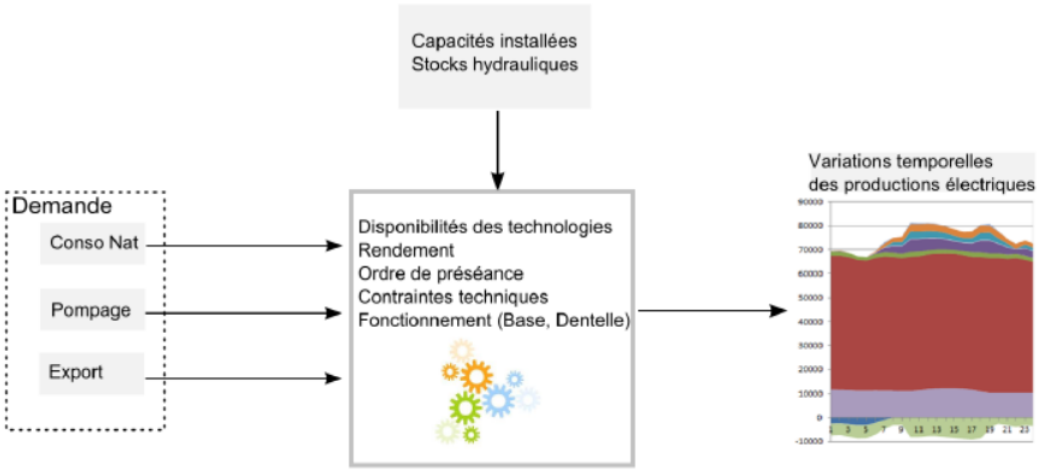


Figure 2.1 – Illustration du modèle de système électrique tiré de Roux (2016)

2.1.3.2 Types de données de mix électrique

Le modèle accepte en entrées plusieurs données fournies par RTE qui permettent de générer le mix électrique d'une année-type : les capacités installées des technologies de production et d'import/export, la consommation nationale d'électricité et le solde des échanges.

En sortie du modèle trois types de mix électrique peuvent être générés : le mix attributionnel horaire et les mix marginaux dérivé et GHG-P dans une approche conséquentielle court-terme. Ces mix ont la forme d'une matrice de 8760 lignes (heures de l'année) et 13 colonnes (technologies de production).

Le mix attributionnel est le mix moyen du système de production généré à la résolution horaire. Il est généré pour une année-type réelle caractérisée principalement par les capacités installées des technologies de production. Il peut être sauvegardé et réutilisé facilement dans un projet.

Le mix marginal dérivé est le mix marginal court terme calculé spécifiquement pour un profil de consommation. Le modèle réalise une optimisation pour déterminer le mix de production modulable qui satisfait le profil de consommation supplémentaire sachant qu'une partie des technologies de production répond déjà à la demande nationale type. Cette approche est la plus précise et permet de différencier des mix marginaux par usage

(chauffage, appareils, production PV). En revanche, elle nécessite de réaliser une simulation du modèle pour chaque profil de consommation différent.

Le mix marginal GHG-P est construit à partir des recommandations du *GHG Protocol*[12]. C'est un mix marginal générique qui peut être appliqué à n'importe quel projet. Après avoir classé les productions modulables par ordre de coût décroissant, le mix marginal correspond à la marge des dernières technologies modulables mises en fonctionnement (les plus chères). L'approche est illustrée à la Figure 2.2. Le pourcentage de cette marge a été fixé à 2,5 %, une valeur moyenne minimisant les écarts entre le mix marginal GHG-P et le mix marginal dérivé sur une centaine de simulations (étude interne). Cette approche est moins précise que l'approche marginale dérivée mais demande moins de temps de calcul puisque le mix GHG-P est construit pour une année-type réutilisable.

Les mix marginaux de court terme ont généralement des impacts environnementaux plus élevés que le mix moyen car ils ont constitués des technologies de production nucléaire, fossiles et de l'import. Les fiches environnementales utilisées pour le calcul des impacts de l'électricité sont détaillées à l'Annexe C. Les impacts environnementaux associés à chaque technologie de production d'électricité sont donnés en Annexe E.

[12] http://www.ghgprotocol.org/standards/project-protocol

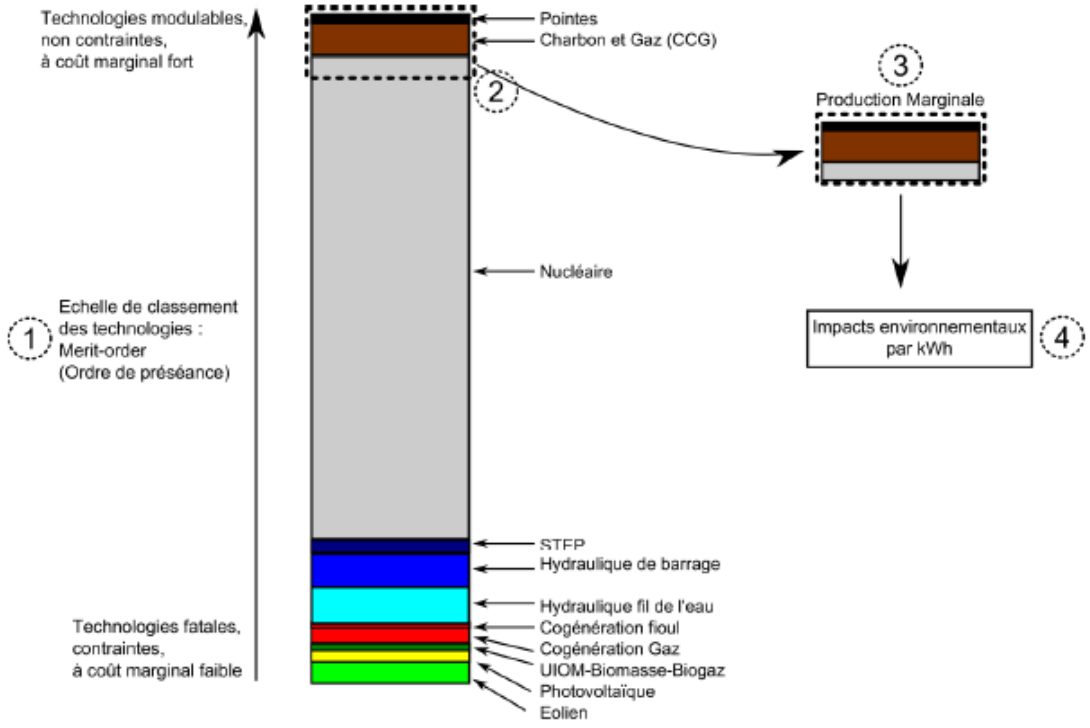


Figure 2.2 – Schéma du principe du mix marginal GHG-P, tiré de Roux (2016)

2.1.4 Algorithme d'optimisation NSGA-II

L'algorithme NSGA-II développé par Deb et al. (2002) est l'algorithme d'optimisation multicritère qui a été utilisé par Recht (2016). À la suite de ses travaux de thèse, l'algorithme et sa procédure d'optimisation ont été implémentés dans Amapola[13] qui est un module d'extension de Pleiades. NSGA-II est un algorithme méta-heuristique évolutionnaire. Il est particulièrement bien adaptés aux problèmes d'optimisation discrets, multidimensionnels, multicritères et multimodaux qui caractérisent les problèmes d'ingénierie complexes comme l'éco-conception de bâtiment. Son inconvénient est de ne pas garantir d'atteindre le front de Pareto global sur des problèmes complexes à cause de la stochasticité de ses opérateurs.

[13] https://www.kocliko.co/amapola/

2.1.4.1 Analogie avec la théorie darwinienne de l'évolution

Comme tout algorithme évolutionnaire, le principe de fonctionnement de NSGA-II repose sur la théorie de l'évolution de Darwin qui postule que, dans une population d'individus aux caractéristiques diversifiées, seuls les individus les plus adaptés à leur environnement peuvent survivre et se reproduire. Ainsi d'une génération à l'autre, toute une population évolue et s'adapte à son environnement par sélection naturelle en héritant des « meilleurs » gènes.

La théorie darwinienne de l'évolution est parfois considérée à tort uniquement à travers le prisme de l'élitisme. En réalité, le darwinisme n'est pas une lutte pour la sélection du *meilleur*, mais du plus **adapté**. Celui que l'on nomme le « meilleur », est le meilleur dans un environnement précis. Une évolution de cet environnement, et ce « meilleur » peut se retrouver tout à fait inadapté par rapport à d'autres individus. C'est là que l'optimisation robuste prend tout son sens : on ne cherche pas le meilleur mais le plus robuste, celui qui est suffisamment adapté dans une diversité d'environnements (et il ne peut généralement pas être le meilleur dans chacun de ces environnements). En allant plus loin, on peut également rechercher l'individu le plus résilient ou le plus adaptable : celui qui peut s'adapter facilement en cas de changement rapide d'environnement. Ce dernier cas s'apparenterait à de la planification ou du pilotage robuste du cycle de vie de bâtiment ce qui est hors du champ de cette thèse.

Transcrire ce cadre évolutionnaire vers le sujet de cette thèse passe par la définition des termes suivants. Le processus évolutionnaire est imité par la procédure d'optimisation multicritère. Un « individu » est une **conception de bâtiment** et une « population » est un **ensemble de conceptions** de bâtiment. Un individu est décrit par un ensemble de « gènes » (regroupés dans un chromosome) et les individus se différencient entre eux grâce aux valeurs de leurs « allèles » sur ces gènes (Figure 2.3). Les « gènes » sont les **variables de décision** ou les paramètres de conception du bâtiment qui peuvent varier. Les « allèles » sont les différentes **valeurs d'un paramètre de conception**.

L' « environnement » dans lequel sont baignés les individus et qui va déterminer leur adaptation est représenté par la **fonction d'évaluation**, les **fonctions objectif** et les **contraintes**. La fonction d'évaluation permet de calculer la *fitness* d'un individu,

c'est-à-dire sa valeur adaptative (ou succès reproducteur). Dans notre étude, cette fonction d'évaluation est composée des modèles de SED et d'ACV qui permettent de calculer les grandeurs d'intérêt d'un individu en lien avec des fonctions objectif et des contraintes environnementales, énergétiques ou de coût.

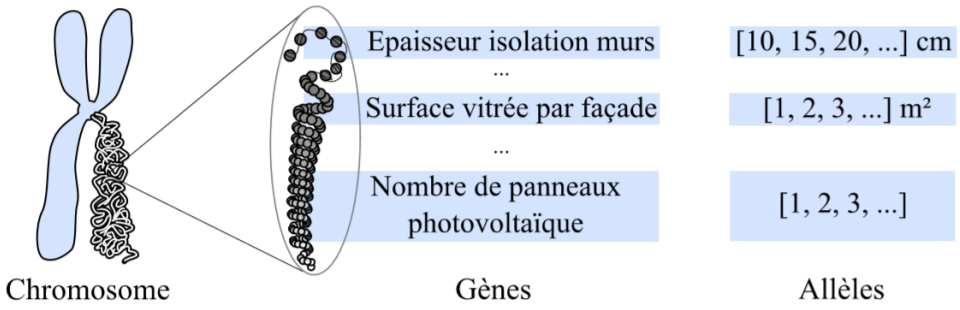


Figure 2.3 – Illustration de la représentation d'un bâtiment en optimisation évolutionnaire, tiré de Recht (2016)

Il est utile de souligner que la fonction d'évaluation, et donc « l'environnement », est sensible aux changements d'hypothèses des calculs de l'ACV et de la SED : données météorologiques, mix électrique, scénario d'occupation, etc. Un changement d'hypothèse en ACV ou en SED peut donc changer les résultats de l'optimisation. Quelques-unes de ces variations et leur influence dans une optimisation multicritère « classique » seront testées, puis l'optimisation multicritère robuste va introduire des variations de l'environnement sous forme de scénarios de cycle de vie de bâtiment.

2.1.4.2 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement essentiel de l'algorithme est basé sur une population d'individus et une boucle générationnelle. Une étape préliminaire amorce cette boucle qui se déroule ensuite en quatre étapes récurrentes puis se termine par une étape d'arrêt. Ces étapes sont décrites dans la suite et illustrées à la Figure 2.4.

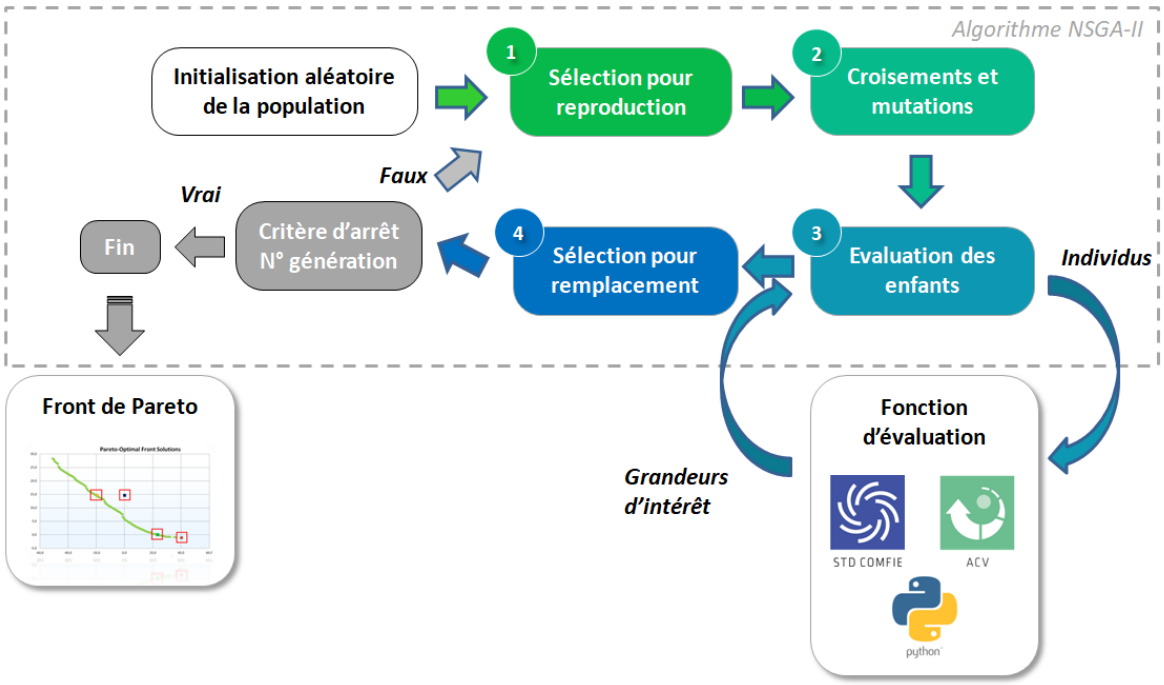


Figure 2.4 – Schéma de fonctionnement de NSGA-II

0. L'étape préliminaire de **l'initialisation** consiste à générer de façon aléatoire une population de départ. Cette étape a peu d'incidence sur la capacité de l'algorithme à converger vers l'optimum global mais une initialisation efficace peut *accélérer* cette convergence et nécessiter moins de générations. Il peut être utile d'apporter des connaissances a priori sur l'optimum recherché en incorporant dans la population initiale des solutions que l'on sait performantes.
1. Durant l'étape de **sélection**, un opérateur identifie les individus qui sont autorisés à se reproduire. Les individus sélectionnés sont appelés « parents ». La pression de sélection est un paramètre important de cette étape qui détermine la vitesse à laquelle la population va se concentrer autour d'un meilleur individu. Plusieurs stratégies de sélection existent :
    - La sélection proportionnelle attribue une probabilité de sélection à un individu proportionnellement à sa *fitness* dans la population ;
    - La sélection par rang s'appuie sur la notion de dominance au sens de Pareto. Le front de Pareto de la population courante peut être qualifié de rang 1. En

enlevant les individus de rang 1, le front de Pareto suivant est de rang 2. On détermine ainsi les différents rangs auxquels appartiennent les individus d'une population courante puis on sélectionne les individus des plus hauts rangs. D'autres critères de sélection peuvent être ajoutés, comme la distance de *crowding* qui permet d'assurer une certaine diversité dans la sélection.

- La sélection par tournoi de foule consiste à tirer au sort un échantillon aléatoire parmi la population courante et à sélectionner le meilleur individu dans cet échantillon.

2. L'étape de **reproduction** consiste à générer des « enfants » à partir des caractéristiques génétiques des « parents » sélectionnés. Deux opérateurs sont utilisés à cette étape : l'opérateur de croisement qui combine les gènes des deux parents pour créer un enfant, et l'opérateur de mutation qui consiste à perturber légèrement le génome. Ces opérateurs sont caractérisés par la probabilité de croisement p_c et la probabilité de mutation p_m, deux paramètres importants à configurer qui influent sur la convergence de l'algorithme. En effet il s'agit d'équilibrer les phénomènes de concentration et de diversification afin de converger en un temps convenable tout en assurant que l'algorithme ne reste pas bloqué dans un optimum local.
3. La troisième étape **d'évaluation** consiste à évaluer la fitness des enfants générés. L'évaluation fait appel à la fonction d'évaluation composée des calculs SED, ACV et de coûts. Durant cette étape, toutes les grandeurs d'intérêt d'un individu qui permettent l'évaluation des fonctions objectif et du respect des contraintes sont calculées.
4. L'étape de **remplacement** crée la génération suivante à partir d'une sélection parmi la population des parents et la population des enfants. Il a été démontré qu'il est nécessaire de garder des parents dans la nouvelle génération afin de ne pas perdre une mémoire des bons individus qui ont été identifiés. Cette stratégie de remplacement est appelée élitisme. Il existe deux stratégies courantes de remplacement élitistes : la première consiste à conserver une partie des parents et à compléter la génération suivante par des enfants, la seconde consiste à sélectionner les meilleurs individus indifféremment parmi la population des parents et enfants combinés. La première méthode est jugée plus efficace dans l'état actuel des connaissances.

Lorsque le **critère d'arrêt** défini par l'utilisateur est atteint, la boucle générationnelle est stoppée. La définition du critère d'arrêt est fondamentale : un arrêt précoce induit le risque que l'algorithme ne converge pas vers l'optimum global, un arrêt tardif est inutilement coûteux en temps de calcul. En pratique le critère d'arrêt peut être défini selon un nombre limite de générations à parcourir ou basé sur une mesure de la convergence de l'algorithme comme par exemple l'hypervolume.

Les performances d'un algorithme évolutionnaire et toute la difficulté de son utilisation résident dans le paramétrage et le choix des opérateurs impliqués dans chacune des étapes : taille de la population courante, probabilités de croisement et de mutation, proportion de remplacement, stratégie de sélection, définition du critère d'arrêt, etc.

2.1.4.3 Spécificités de NSGA-II

L'aspect multicritère en optimisation exige un algorithme qui puisse mener conjointement une intensification et une diversification de la recherche de solutions, ce à quoi répond NSGA-II grâce notamment à ses mécanismes d'élitisme de tri non-dominé basé sur la dominance de Pareto et de distance de *crowding*.

L'élitisme en optimisation consiste à conserver les meilleurs individus parmi la population courante et les enfants, 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. Ce mécanisme permet de garder en mémoire les solutions performantes et favorise l'intensification de la recherche qui améliore les capacités de convergence de l'algorithme. Néanmoins une intensification trop forte peut enfermer l'algorithme dans un optimum local en réduisant la diversité génétique de la population. Dans le cas de NSGA-II les individus sont sélectionnés sur la base de leur rang de Pareto.

Pour pallier le risque d'intensification et favoriser la sélection d'individus inédits d'un point de vue génétique, la sélection dans NSGA-II repose sur la mesure de la distance de *crowding*, la distance d'une solution par rapport aux solutions voisines de même rang. La distance s'appuie sur le calcul de l'hypercube entre les voisins de la solution ; dans le cas d'une optimisation à deux critères, il s'agit du demi-périmètre de l'hypersurface. Plus la

distance de *crowding* d'une solution est élevée plus cette solution se distingue génétiquement de ses voisines, l'inclure dans la génération suivante apporte alors une diversification de la recherche.

2.1.4.4 Implémentation informatique de NSGA-II

Nous décrivons ici l'implémentation informatique de l'algorithme dans des travaux d'optimisation multicritère de bâtiment zéro-énergie. L'algorithme provient de la librairie Deap[14] programmée en Python. Les allèles du génome sont codés sous forme d'une liste d'entiers adaptés aux variables de décision discrètes et catégorielles.

La population initiale est générée par des tirages aléatoires des valeurs des allèles de chaque gène d'un individu.

La sélection pour la reproduction repose sur une stratégie par tournoi de foules. Il s'agit de dupliquer la population courante de *m* individus, puis à effectuer *m/2* tournois de deux individus dans la population courante et dans la population dupliquée afin de sélectionner *m* parents. Les critères de sélection sont, dans l'ordre de priorité : le nombre de contraintes violées, le rang du front de Pareto d'appartenance et la distance de *crowding*. Si des contraintes sont imposées, l'individu qui viole le moins de contraintes est sélectionné. Il s'agit de la méthode multi-contrainte utilisée par Recht (2016). Si les deux solutions du tournoi violent autant de contraintes, l'individu appartenant au meilleur rang de Pareto est sélectionné. Si les solutions appartiennent au même rang de Pareto, celle qui a la plus grande distance de *crowding* est sélectionnée car elle contribue à la diversification de la population. Enfin si aucun de ces critères ne permet de les départager un tirage aléatoire est effectué. Les contraintes sont gérées par la méthode multi-contraintes comme indiqué dans la thèse de Recht, l'ancienne gestion des contraintes était basée sur la pénalisation.

L'opérateur de croisement est un croisement à point de coupure qui s'applique sur deux parents afin de générer deux enfants (Figure 2.5). Tout d'abord un tirage aléatoire est

[14] https://deap.readthedocs.io/en/master/

effectué pour déterminer s'il va y avoir croisement en fonction de la probabilité de croisement p_c. S'il y a croisement, l'emplacement du point de coupure sur les chaînes binaires est déterminé de manière aléatoire, les deux enfants sont alors les deux combinaisons possibles des deux parties de chaînes binaires des parents. Pour chaque gène de chaque individu de la population courante, l'opérateur de mutation détermine par tirage aléatoire et en fonction de la probabilité de mutation p_m s'il va y avoir une mutation. En cas de mutation le gène est modifié par tirage aléatoire de son allèle.

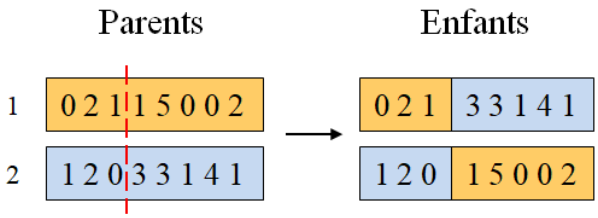


Figure 2.5 – Illustration du croisement à un point de coupure de la représentation du génome en une chaîne d'entiers

Les enfants sont évalués par la fonction d'évaluation pour calculer les grandeurs d'intérêt énergétiques, environnementales et de coût. La stratégie de sélection élitiste mise en œuvre sélectionne les meilleurs individus parmi la population des parents et des enfants combinés. Les individus sont classés et sélectionnés selon les mêmes critères que lors de l'étape de sélection pour la reproduction. Enfin le critère d'arrêt est basé sur un nombre limite de générations. Le développement d'un critère d'arrêt basé sur une mesure de l'évolution de la convergence est étudié dans la suite du chapitre.

2.2 Améliorations apportées à la fiabilité des outils

Cette partie présente les travaux qui ont été réalisés afin d'améliorer la fiabilité du processus d'optimisation multicritère dans son ensemble. Ces développements se sont concentrés sur :

- La qualité des méthodes de caractérisation utilisées en ACV : l'objectif est de réduire les sources d'incertitudes liées aux modèles environnementaux de caractérisation et au choix des indicateurs environnementaux.

- La qualité des données d'inventaire utilisées en ACV : il s'agit de réduire les sources d'incertitudes liées aux données notamment dans leur représentativité temporelle et technologique.
- L'amélioration de la vitesse de convergence de l'algorithme d'optimisation : elle permet de réduire les temps de calcul ou mieux converger vers l'optimum global pour un coût calculatoire donné.

La construction de la base de données pour EQUER est réalisée avec la librairie Brigthway2[15] programmée en Python et grâce à des outils développés par Audard (2016) et Pannier (2017) durant leurs travaux de thèse.

2.2.1 Mise à jour des méthodes de caractérisation

2.2.1.1 Principe des méthodes de caractérisation

Les facteurs de caractérisation convertissent une émission de substance ou une consommation de ressource en impacts selon des indicateurs environnementaux. Ces facteurs de caractérisation sont issus de méthodes de caractérisation construites à partir de modèles environnementaux qui décrivent les mécanismes d'impacts des flux de substances et de ressources. Ces mécanismes comprennent la dégradation d'une substance émise et une suite de processus physico-chimiques dans le temps qui aboutissent finalement à des dommages sur une ou plusieurs aires de protections.

Niveaux midpoint et endpoint

Les processus physico-chimiques intermédiaires sont appelés les effets de niveau *midpoint* et les dommages les effets de niveau *endpoint.* Un indicateur de niveau *midpoint* est souvent exprimé en équivalent d'une substance de référence tandis qu'un indicateur de niveau *endpoint* exprime des dommages potentiels. Une catégorie d'impact comme le changement climatique est décrite par un indicateur de niveau *midpoint* et un ou plusieurs

[15] https://brightwaylca.org/

indicateurs de niveau *endpoint*. La illustre ce cheminement, de l'inventaire des flux élémentaires jusqu'au niveau *endpoint* en passant par le niveau *midpoint*.

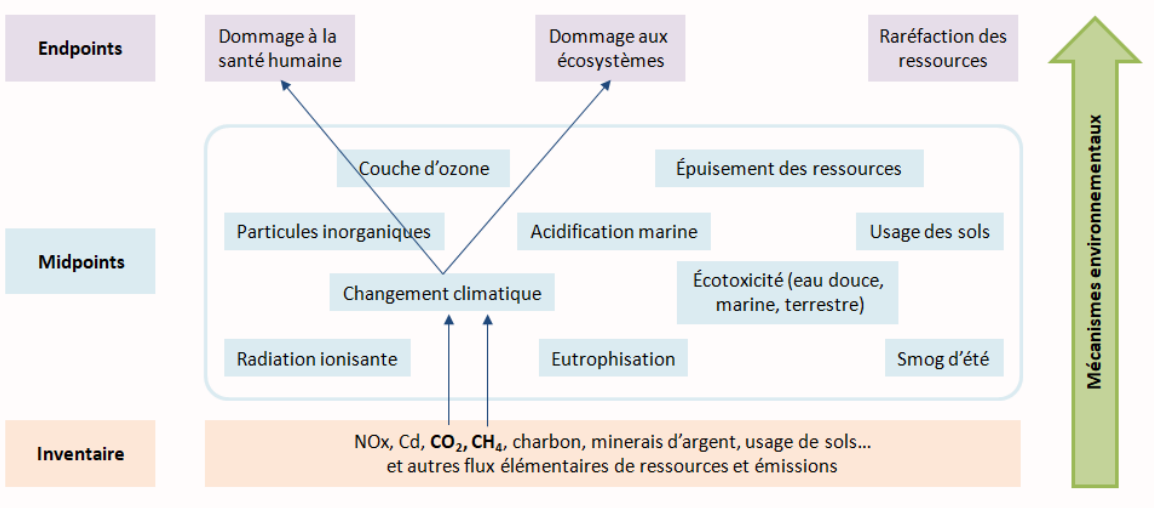


Figure 2.6 - Schéma illustratif des étapes de l'inventaire à la caractérisation des impacts au niveau des *midpoints* puis des *endpoints*

Aires de protection

Trois aires de protection sont communément admises en ACV : la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources naturelles. Une aire de protection est composée de deux types de valeurs à protéger : les valeurs fonctionnelles, qui s'inscrivent dans un point de vue utilitariste ou anthropocentré, et des valeurs intrinsèques de protection des vies (humaines ou non) et des objets. Dans la réalité, certains phénomènes peuvent impacter à la fois des valeurs intrinsèques et fonctionnelles, et plusieurs aires de protection en même temps comme nous allons le voir dans la suite. Une description résumée des trois aires de protection est donnée dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 – Description résumée des différentes aires de protection

Aire de protection	Contribution aux dommages	Type de dommages
Santé humaine	Changement climatique, destruction de la couche d'ozone stratosphérique, création d'ozone photochimique, radiation ionisante, toxicité cancérigène, toxicité non-cancérigène, particules inorganiques, disponibilité en eau	Années de vie perdues en bonne santé (DALY)
Environnement naturel	Changement climatique, destruction de la couche d'ozone stratosphérique, création d'ozone photochimique, radiation ionisante, acidification, eutrophisation, écotoxicité, transformation et usage des sols, dessiccation, salinisation, disponibilité en eau, micro-plastiques[16]	Nombre d'espèces potentiellement disparues (PDF)
Ressources naturelles	Ressources minérales, combustibles fossiles, disponibilité en eau, bois, poissons, autres services écosystémiques : production primaire, pollinisation, etc.	Quantité de ressources épuisées définitivement et/ou coût monétaire pour la société

La santé humaine est caractérisée par une valeur intrinsèque de durée de vie en bonne santé, et une valeur fonctionnelle liée au travail et à la productivité qu'elle peut offrir. L'indicateur le plus généralement utilisé en ACV est basé sur le concept d'« années de vie perdues en bonne santé », ou *Disability Adjusted Life Years (DALY)* en anglais. Le DALY évalue uniquement les dommages causés à la valeur intrinsèque d'une vie humaine en mesurant à la fois la quantité et la qualité de vie perdues sans pondération par l'âge. Un indicateur DALY est la somme pondérée des années de vie perdues et des années de vie en mauvaise santé engendrées par la gravité d'un trouble.

[16] https://www.pre-sustainability.com/news/plastic-soup-dish-better-not-served-at-all

Quelques aspects de la méthode de calcul sont toujours sujets de discussions :

- le caractère handicapant d'un trouble dont le jugement est subjectif, évalué par des experts et/ou les personnes concernées ;
- les données statistiques utilisées dans la construction de la méthode de caractérisation et leur validité limitée dans le temps et dans l'espace au regard de l'état et de l'évolution des systèmes de soins dans certaines régions ;
- le faible niveau de fiabilité pour certaines substances caractérisées en ACV à cause de données manquantes.

  Néanmoins, l'approximation de ces aspects reste acceptable étant donné la très forte incertitude qui réside dans le contexte dans lequel une émission d'arrière-plan a lieu : l'exposition des populations, la forme dans laquelle se trouvent les substances (p.ex. métaux), la distance du cours d'eau le plus proche, le climat, l'âge des personnes, le type de cancer, etc. Une meilleure considération du contexte d'émission pourrait reposer entre autres sur le développement d'ACV spatialisées plus précises.

L'aire de protection de l'environnement naturel vise à protéger les fonctions et la stabilité structurelle des écosystèmes qui composent la biosphère. Un écosystème est un système complexe dans lequel des organismes vivants (la biocénose) produisent des échanges d'information, d'énergie et de matière (notamment par l'intermédiaire de réseaux trophiques ou chaînes alimentaires), entre eux et avec leur environnement (biotope) sur une échelle spatiale donnée. Les fonctions d'un écosystème sont les processus biologiques qui, en son sein, permettent son fonctionnement, son entretien et sa résilience, le tout dans un équilibre dynamique. Parmi ces fonctions, il y a par exemple la production de biomasse, la minéralisation, la pollinisation par certaines espèces (abeilles, papillons, colibris, chauves-souris…) ou encore l'élimination des déchets organiques par les détritivores (lombric, bousiers…) qui permet l'enrichissement du sol en nutriments. Les écosystèmes sont d'une telle complexité qu'il est difficile d'évaluer les effets négatifs ou positifs sur la stabilité de leur structure et de leurs fonctions. En ACV, la biodiversité des espèces est donc généralement utilisée au niveau *endpoint* pour évaluer les dommages causés à la qualité des écosystèmes car elle est positivement corrélée à la qualité de structure et des fonctions d'un écosystème. La perte de biodiversité est mesuré par la part d'espèces potentiellement

disparues ou *Potentially Disappeared Fraction of species (PDF)* en anglais. La mesure est un potentiel à l'échelle globale exprimée en PDF.m².an. Cette valeur peut être divisée par l'aire d'une région et une période temporelle pour y obtenir la fraction d'espèce disparue (*PDF*). En connaissant la densité d'espèce, il peut ensuite être calculé le nombre d'espèces disparues durant la période donnée. Dans une application usuelle de l'ACV, l'inventaire des flux n'est pas spatialisé et l'expression du potentiel global des dommages en PDF.m².an est conservée.

L'aire de protection des ressources naturelles vise à protéger la disponibilité en ressources biotiques et abiotiques. Les ressources biotiques sont généralement renouvelables mais limitées en flux et concernent par exemple tous les végétaux, le bois, les poissons, mais il convient de protéger également les terres arables, l'eau, etc. Les ressources abiotiques sont généralement non renouvelables et regroupent les minerais, le pétrole, le gaz et le charbon. Cette aire de protection anthropocentrée concerne la raréfaction, voire la disparition des ressources ainsi que la stabilité des fonctions des écosystèmes utiles aux sociétés humaines, ces dernières étant aussi appelées « services écosystémiques ». La protection des ressources naturelles est fortement liée aux aires de protection de la santé humaine et de la qualité de l'environnement naturel pour plusieurs raisons. D'abord, car l'extraction de ressources peut directement affecter un écosystème et les humains qui y vivent comme la surpêche (qui peut entraîner un manque de nourriture pour les populations humaines et animales locales), la déforestation et l'usage intensif de l'eau et des sols. Par ailleurs, des dommages à l'environnement naturel peuvent nuire à sa capacité à fournir des services écosystémiques, et s'il s'agit de services vitaux aux humains les trois aires de protections peuvent être touchées en même temps. Les services écosystémiques sont multiples et concernent l'approvisionnement (nourriture, combustibles, matériaux, médicaments), les services de régulation (du climat, des pathogènes, la pollinisation), les services socio-culturels (esthétique, spirituels, récréatifs, éducatifs) et les services de supports qui soutiennent les autres services (production primaire, cycles de l'eau et du carbone, formation des sols). Certains indicateurs de niveau *endpoint* caractérisent les dommages causés à cette aire de protection à travers la monétisation des coûts engendrés par la perte de production et de services, voire à leur remplacement par des services humains. À titre d'exemple, il a été montré que le service

de pollinisation des insectes, essentiel à la production agricole, vaudrait en France 2,3 à 5,3 milliards d'euros[17]. Il n'existe pour le moment pas encore de méthode de niveau *endpoint* suffisamment complète (prenant en compte à la fois les ressources minérales, fossiles, l'eau, le bois, les poissons) et mature pour être recommandée par l'ILCD. La majorité des méthodes développées au niveau *midpoint* et *endpoint* concernent l'épuisement des ressources abiotiques (ressources minérales et fossiles) et l'usage de l'eau (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2011).

Exemple du changement climatique

La catégorie d'impact du changement climatique est présentée à titre d'exemple avec sa chaîne de cause à effet illustrée à la Figure 2.7. L'émission de gaz à effet de serre s'ajoute à la concentration existante dans l'atmosphère et renforce le phénomène de forçage radiatif qui va réchauffer l'atmosphère et créer des changements climatiques : hausse globale des températures, événements météorologiques extrêmes plus fréquents et intenses, fortes précipitations et sécheresses.

Le GIEC fournit et met régulièrement à jour des indicateurs d'impact du changement climatique (IPCC, 2013). Le « potentiel de réchauffement global sur 100 ans » (*Global Warming Potential* ou GWP100) est un indicateur qui traduit l'effet du forçage radiatif intégré sur 100 ans. Le « potentiel de température globale sur 100 ans » (*Global Temperature Potential* ou GTP100) est un autre indicateur qui représente un potentiel de changement de température. Bien que le GTP100 peut être assimilé au potentiel cumulé de réchauffement sur le long terme et que le GWP100 représente un réchauffement rapide à plus court terme, ces deux indicateurs sont complémentaires au niveau *midpoint* où ils sont tous deux exprimés en équivalent de CO_2 (Bulle et al., 2019). Au niveau *endpoint*, peuvent être définis des indicateurs de court et long terme qui expriment des dommages sur la santé humaine et l'environnement naturel en DALY et en PDF respectivement. Ces dommages sont dus à plusieurs effets simultanés : l'atteinte aux fonctions des écosystèmes dont une

[17] https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Efese%20-%20Le%20service%20de%20pollinisation%20-%20Analyse.pdf

diminution de la production primaire nette de biomasse, des changements de biomes (climats et qualité des sols) avec le déplacement voire la disparition d'espèces animales et végétales, et l'augmentation des feux de forêts et incendies naturels. Concernant la santé humaines les conséquences peuvent être : la malnutrition avec une perte des qualités nutritionnelles des récoltes, des inondations plus fréquentes et intenses, la propagation de maladies infectieuses comme le paludisme et la dengue dans de nouvelles régions, et les effets liés à des vagues de chaleurs plus fréquentes et intenses.

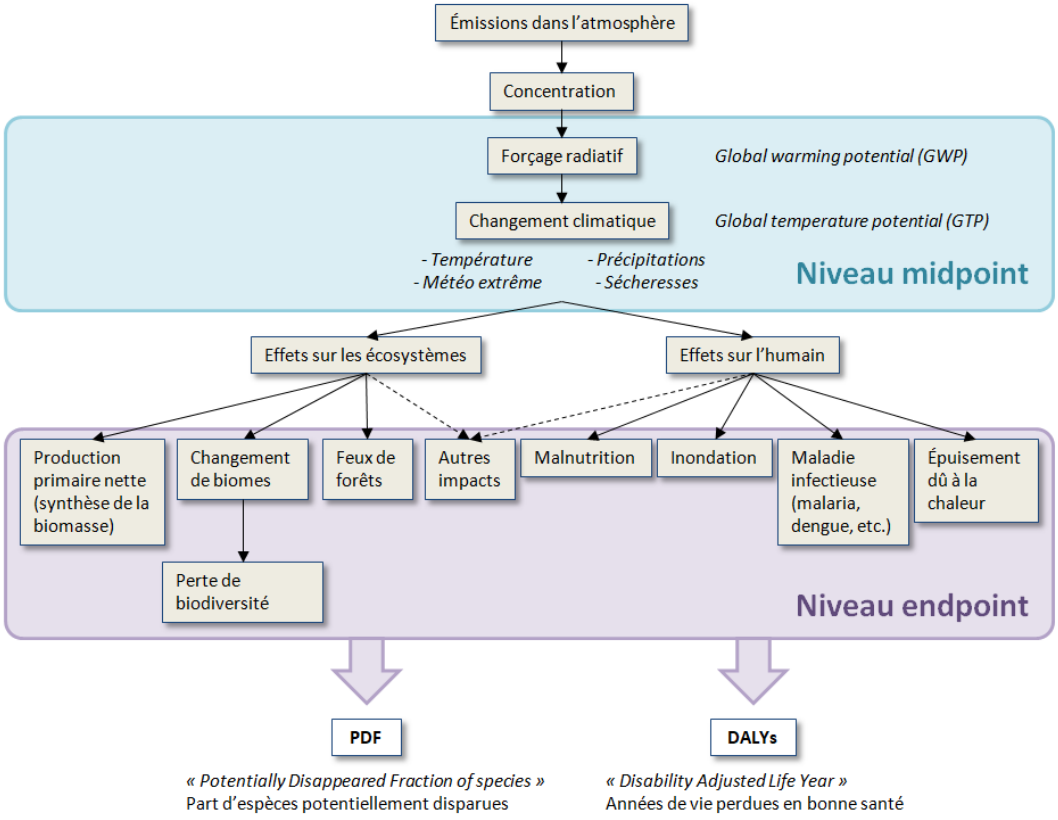


Figure 2.7 – Mécanismes environnementaux du changement climatique. Adapté de European Commission - Joint Research Centre (2011)

2.2.1.2 Critères de sélection de méthodes de caractérisation

L'*ILCD Handbook : Framework and requirements LCIA models and indicators* décrit plusieurs critères d'évaluation pour choisir une méthode de caractérisation (European Commission et al., 2011):

- L'exhaustivité des effets pris en compte. Par exemple, est-ce que le modèle de caractérisation couvre une majorité des mécanismes environnementaux et des flux élémentaires les plus pertinents au regard des aires de protection ?
- La pertinence environnementale. Est-ce que tous les mécanismes environnementaux implémentés reflètent les dernières connaissances scientifiques disponibles ?
- La robustesse et la certitude scientifique. Par exemple, est-ce que les incertitudes du modèle ont été identifiées et décrites ?
- La documentation, la transparence et la reproductibilité. Par exemple, est-ce que le modèle est documenté et les facteurs de caractérisation sont publiés et accessibles ?
- L'applicabilité. Est-ce que la méthode est directement applicable par le praticien en ACV dans la plupart des logiciels d'ACV ?

Les indicateurs de niveau *endpoint* sont en général plus incertains que ceux de niveau *midpoint* pour plusieurs raisons. Les mécanismes environnementaux à prendre en compte sont plus nombreux et complexes car situés en aval de la chaîne de cause à effet. Certains de ces mécanismes ne disposent pas encore d'une modélisation suffisamment fiable. Néanmoins, l'adoption d'un ensemble d'indicateurs endpoints permet une modélisation plus complète des impacts, même si certains indicateurs sont individuellement peu précis il peut être favorable d'améliorer l'exhaustivité de l'ensemble de l'évaluation. Afin de minimiser ces incertitudes et d'éviter le double comptage, il est recommandé d'employer des indicateurs de niveau *endpoint* qui proviennent tous d'une même méthodologie telle que ReCiPe (Huijbregts et al., 2017) ou Impact World+ (Bulle et al., 2019).

2.2.1.3 Implémentation de la méthode Impact World+

Au regard des critères de sélection présentés ci-avant et faute de temps pour intégrer les deux méthodes, la méthodologie Impact World+ (Bulle et al., 2019) a été retenue pour ces travaux. Elle présente l'avantage d'être très récente donc plus représentative des connaissances scientifiques actuelles. Elle propose également un ensemble cohérent et varié d'indicateurs de niveau *midpoint* et *endpoint* dont de nouvelles catégories d'impacts. Enfin, elle est facilement utilisable car ses données sont ouvertes et disponibles avec la

librairie Brightway2. Elle présente toutefois l'inconvénient de pouvoir comporter des erreurs ou des oublis étant donné le manque de maturité de son implémentation pour Python. Il sera donc nécessaire à l'avenir de suivre régulièrement les mises à jour et de les intégrer à la base de données.

Un autre avantage d'Impact World+ est de proposer une diversité d'indicateurs de niveau *endpoint* qui permettent de calculer des impacts totaux sur la qualité des écosystèmes et la santé humaine qui sont plus fiables que les méthodes initiales utilisées dans EQUER. Les indicateurs de niveau *endpoint* de la base de données initiale d'EQUER provenaient de la méthodologie Eco-indicator 99 (EI99) (Goedkoop et Spriensma, 2001) qui date de presque 20 ans. Moins de catégories d'impacts de niveau *endpoint* sont représentées dans EI99 en comparaison avec Impact World+, en particulier en ce qui concerne la qualité des écosystèmes où seule l'écotoxicité terrestre et aquatique est prise en compte contre plus d'une dizaine de phénomènes environnementaux dans Impact World+. Cette comparaion est donnée dans le Tableau 2.3 et le jeu d'indicateurs qui a été retenu est donné dans le Tableau 2.4. Les indicateurs « ETB » correspondent à des aggrégations de flux d'inventaire pour estimer les quantités de déchets inertes et radioactifs.

Impact World+ propose certaines catégories disponibles en deux indicateurs différents, l'un dont l'impact est intégré sur un horizon de court terme (100 ans) et l'autre à long terme (> 500 ans). Dans ce cas, les indicateurs de court terme sont choisis par défaut car c'est l'approche la plus similaire à celle des indicateurs initiaux. Toutefois, une étude de sensibilité des impacts d'un bâtiment calculés avec les deux approches serait intéressante. Les indicateurs retenus sont détaillés dans la suite.

Le changement climatique provient de la méthode IPCC 2017. L'indicateur d'énergie primaire non renouvelable et renouvelable de la méthode CED est conservé. Les indicateurs développés spécialement pour EQUER (par exemple concernant les déchets et les déchets radioactifs) sont conservés à l'exception de l'indicateur d'eau consommée qui est remplacé par celui d'Impact World+. Deux indicateurs *midpoint* d'effets respiratoires et d'occupation des sols sont ajoutés pour représenter les problématiques de pollution de l'air et d'artificialisation des sols.

Les indicateurs *endpoint* des dommages totaux sur la qualité de l'écosystème et la santé humaine sont obtenus en calculant la somme des effets *endpoint* indiqués dans le Tableau 2.3. Une analyse de contribution est donc possible en désagrégeant ces indicateurs. Bulle et al. (2019) ont réalisé une ACV des activités anthropogéniques globales et ont montré une contribution dominante du changement climatique et des effets respiratoires dans les dommages à la santé humaine contre une faible contribution de la radiation ionisante, de la destruction de la couche d'ozone et de l'ozone photochimique. Dans les dommages aux écosystèmes, le changement climatique et l'usage des sols (occupation et transformation) ont une contribution dominante. Une application menée sur un projet urbain a par ailleurs montré la prédominance de la toxicité, cancérigène et non cancérigène dans les dommages à la santé et le rôle important de l'eutrophisation et de l'acidification dans les dommages aux écosystèmes (Cohen et al., 2019).

L'indicateur d'épuisement des ressources ne couvre que les ressources minérales et non les ressources fossiles (charbon, gaz, pétrole) contrairement à l'ancien indicateur. Cela peut être justifié par le fait qu'il existe un indicateur de consommation d'énergie primaire qui prend déjà en compte ces ressources fossiles. Pour plus de détails sur la méthodologie et ses méthodes de caractérisation, les lecteurs peuvent se référer à l'article de Bulle et al. (2019) et ses documents annexes.

Tableau 2.3 – Catégories d'impact considérées au niveau *endpoint* dans la version initiale d'EQUER et dans l'implémentation d'Impact World+

Aire de protection	Catégories *endpoint* initiales (Eco-indicator 99)	Catégories *endpoint* de Impact World+
Qualité des écosystèmes	Écotoxicité terrestre et aquatique	Eutrophisation aquatique et marine
		Acidification terrestre, aquatique et marine
		Écotoxicité aquatique
		Radiation ionisante
		Changement climatique
		Occupation des sols
		Transformation des sols
		Pollution thermique marine
		Disponibilité en eau, écosystèmes terrestre et aquatique
Santé humaine	Changement climatique	Changement climatique
	Destruction de la couche d'ozone	Destruction de la couche d'ozone
	Radiation ionisante	Ozone photochimique
	Effets respiratoires	Radiation ionisante
	Effets cancérigènes	Effets respiratoires
		Effets cancérigènes
		Effets non-cancérigènes
		Disponibilité en eau

Tableau 2.4 – Nouveau jeu d'indicateurs d'impact basé sur Impact World+

n°	Indicateur	Méthode	Unité	Type	Changement
1	Effet de serre (100 ans)	IW+	kg CO_2 eq.	midpoint	Mise à jour
2	Acidification	IW+	kg SO_2 eq.	midpoint	Mise à jour
3	Demande cumulative d'énergie	CED	MJ	midpoint	Identique
4	Eau utilisée	IW+	L	midpoint	Mise à jour
5	Déchets produits	ETB	kg	midpoint	Identique
6	Eutrophisation	IW+	kg PO_4 eq.	midpoint	Mise à jour
7	Production d'ozone photochimique	IW+	kg d'éthylène eq.	midpoint	Mise à jour
8	Déchets radioactifs	ETB	m^3	midpoint	Identique
9	Occupation des sols	IW+	m^2.an	midpoint	Nouveau
10	Effets respiratoires	IW+	kg PM2.5 eq.	midpoint	Nouveau
11	Destruction ozone stratosphérique	IW+	kg CFC-11 eq.	midpoint	Mise à jour
12	Qualité des écosystèmes (total)	IW+	PDF.m^2.an	endpoint	Mise à jour
13	Santé humaine (total)	IW+	DALY	endpoint	Mise à jour
14	Ressources minérales	IW+	kg perdus	midpoint	Changement

2.2.2 Mise à jour des données d'inventaire

2.2.2.1 Mise à jour vers la base de données ecoinvent 3.4

Les données d'inventaires initiales d'EQUER proviennent de la version 2.2 de la base de données ecoinvent datant de 2010. Une mise à jour a été effectuée pour passer à la version « ecoinvent 3.4 *cut-off* » qui date de 2017. Il faut noter qu'EQUER ne suit pas

l'approche *cut-off* puisque des impacts évités sont considérés pour le recyclage en fin de vie et l'export d'électricité produite localement. Mais les données *cut-off* d'ecoinvent sont utilisées pour éviter le double comptage d'impacts évités. La procédure est basée sur la librairie Brightway2 et permet de convertir les données d'ecoinvent au format Ecospold2 vers une base de données adaptée à EQUER.

Bien que cette version de la base de données d'ecoinvent soit plus récente il y subsiste des données d'inventaire qui n'ont pas été profondément mises à jour. C'est le cas notamment des systèmes solaires photovoltaïques.

2.2.2.2 Fabrication du système solaire photovoltaïque

Les technologies solaires PV sont parmi celles qui se développent le plus rapidement avec des baisses de coûts importantes depuis de nombreuses années. Cela est dû à une amélioration des procédés utilisés et à la réduction des ressources nécessaires pour produire un module de puissance équivalente. Ces progrès ne sont pas reflétés par les fiches actuellement disponibles dans ecoinvent qui surestiment donc les impacts de fabrication des systèmes. Dans les premières réalisations d'optimisation multicritère de bâtiment il a été observé que l'installation de système solaire PV était défavorisée parmi les solutions de conception optimales malgré leurs bénéfices environnementaux à l'utilisation. Cela était grandement dû à l'intensité carbone très faible du mix électrique français, cette observation n'aurait pas pu se faire avec le mix électrique plus carboné d'autres pays. Après avoir enquêté il se trouve que la fiche du système solaire PV polycristallin domestique « *electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted, FR* » a été ajoutée en 2005 et n'a pas bénéficié de mise à jour majeure de son inventaire depuis 2010.

Romain Besseau et Paula Lopez Perez, du centre OIE (Observation, Impacts, Energie) de Mines ParisTech basé à Sophia-Antipolis, nous ont communiqué des données concernant les progrès technologiques et les différences entre les procédés actuels et ceux de la fiche initiale d'ecoinvent (Besseau, 2019). Les améliorations les plus significatives retenues pour la mise à jour sont les suivantes :

- une réduction de l'épaisseur des cellules de 24% ;

- une amélioration du rendement du panneau de 12% à surface égale ;
- le poids de l'onduleur divisé par 3 (-66%) ;
- une réduction de la consommation d'électricité dans la fabrication des cellules au silicium qui passe de 120 kWh/kg à 30 kWh/kg.

Ces modifications ont été appliquées à la fiche ecoinvent v3.4 *« photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, multi-Si, laminated, integrated, on roof »* à l'aide de la librairie Brightway2. La Figure 2.8 montre les conséquences de cette mise à jour de l'inventaire sur les impacts environnementaux. Le système PV issu de l'inventaire de fabrication originelle d'ecoinvent est appelé « PV2010 » et celui issu des améliorations technologiques apportées à cet inventaire est appelé « PV2019 ». L'effet de serre est réduit de 44% ce qui est proches des informations de nos collègues indiquant une diminution de 50%. Les impacts de plusieurs indicateurs sont réduits de 40 à 50 % comme l'acidification, l'énergie primaire, l'eau, les déchets et les particules fines. La production de déchets radioactifs est réduite de 58% à cause de la forte baisse d'utilisation d'électricité dont une partie des procédés est située en Suède qui possède une forte production d'électricité nucléaire.

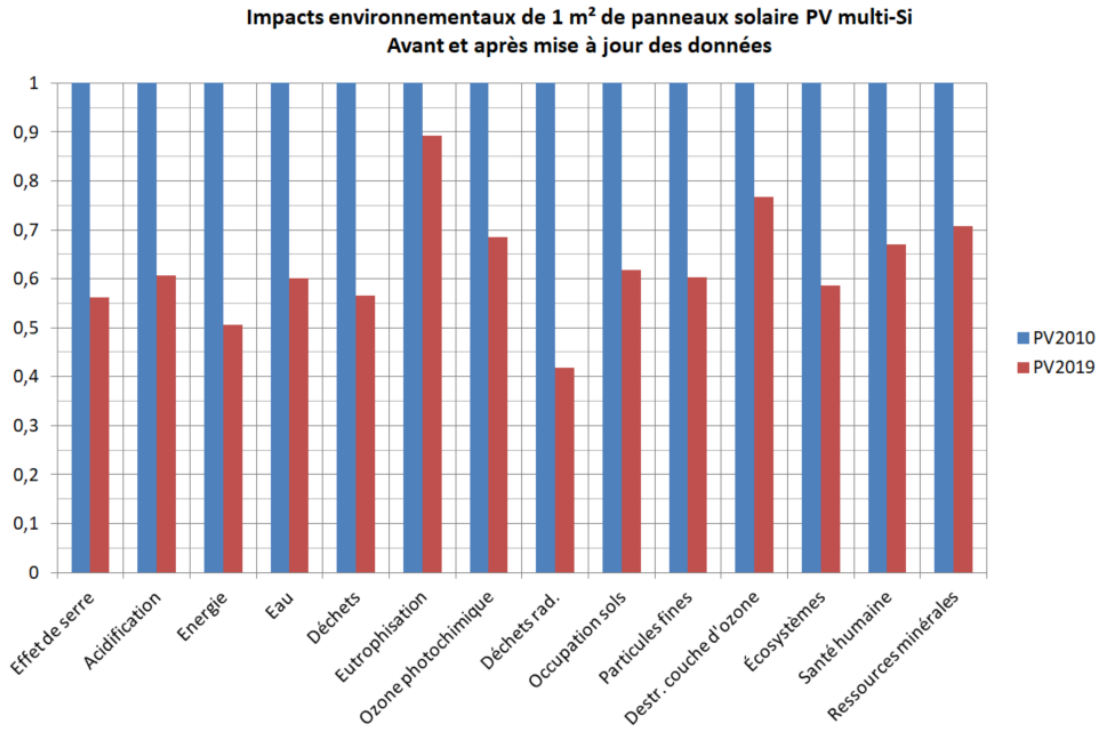


Figure 2.8 – Comparaison des impacts du système PV avant et après mise à jour

On estime la performance environnementale d'un système PV en considérant son unité fonctionnelle comme « 1 kWh produit durant sa vie » (Marini et al., 2014). L'ACV d'un panneau PV peut être menée de deux manières qui se différencient par le choix des frontières du système considérées :

- La première est attributionnelle avec des frontières du système qui comprennent la fabrication, la fin de vie et des transports du panneau. Aucun impact environnemental n'est associé à la production d'électricité durant l'étape d'utilisation du système PV.
- La seconde approche est conséquentielle, les frontières du système sont élargies pour considérer les conséquences d'une production d'électricité sur le réseau. Dans cette approche l'export d'électricité PV sur le réseau évite la production d'électricité par le système électrique national ce qui permet d'attribuer des bénéfices environnementaux à la production d'électricité à l'étape d'utilisation du système PV. Cette approche est la plus adaptée en ACV de bâtiment zéro-énergie/positive où la fonction de producteur d'énergie sur le réseau doit être prise en compte.

La Figure 2.9 montre l'effet de serre par kWh électrique produit par un système PV sous différentes hypothèses et le compare à l'effet de serre moyen par kWh du mix électrique français de l'année 2016 généré avec le modèle de système électrique.

L'unité fonctionnelle est un kWh produit par le système durant sa vie avec les hypothèses suivantes :

- Fabrication selon les données de PV2010 ou PV2019.
- Les transports entre l'usine et le site (100 km) et le site et le centre de traitement (50 km) sont pris en compte.
- La durée de vie est de 30 ans pour PV2010 et de 25 ou 30 ans pour PV2019. Le panneau est recyclé à l'issue de sa durée de vie.
- Le système est recyclé en fin de vie d'après les données décrites en section 2.2.2.5. Les bénéfices issus du recyclage sont attribués à 50% au système PV et à 50% en dehors des frontières.

- Les impacts évités sont calculés à partir de la production photovoltaïque horaire sur l'année météorologique RT2012 à Trappes et du mix électrique français de 2016 généré à partir du modèle de système électrique (section 2.1.3).
- La puissance du système est de 5kWc avec une production annuelle constante de 137,3 kWh/m² de surface photovoltaïque pendant toute sa durée de vie.

Les résultats montrent qu'avec les anciennes données d'inventaires, produire de l'électricité PV sur un bâtiment va générer des impacts environnementaux, en considérant ou non une hypothèse de substitution. Avec ces données obsolètes et sans substitution, la production PV émet 68,1 gCO_2eq/kWh contre 56,4 gCO_2eq/kWh pour les données de l'électricité du réseau issues du modèle. Avec les anciennes données et même en comptant des impacts évités associés à la production d'électricité PV, l'installation de panneaux PV génère une émission de gaz à effet de serre supplémentaire dans le bilan d'un bâtiment de l'ordre de 19,3 gCO_2eq/kWh.

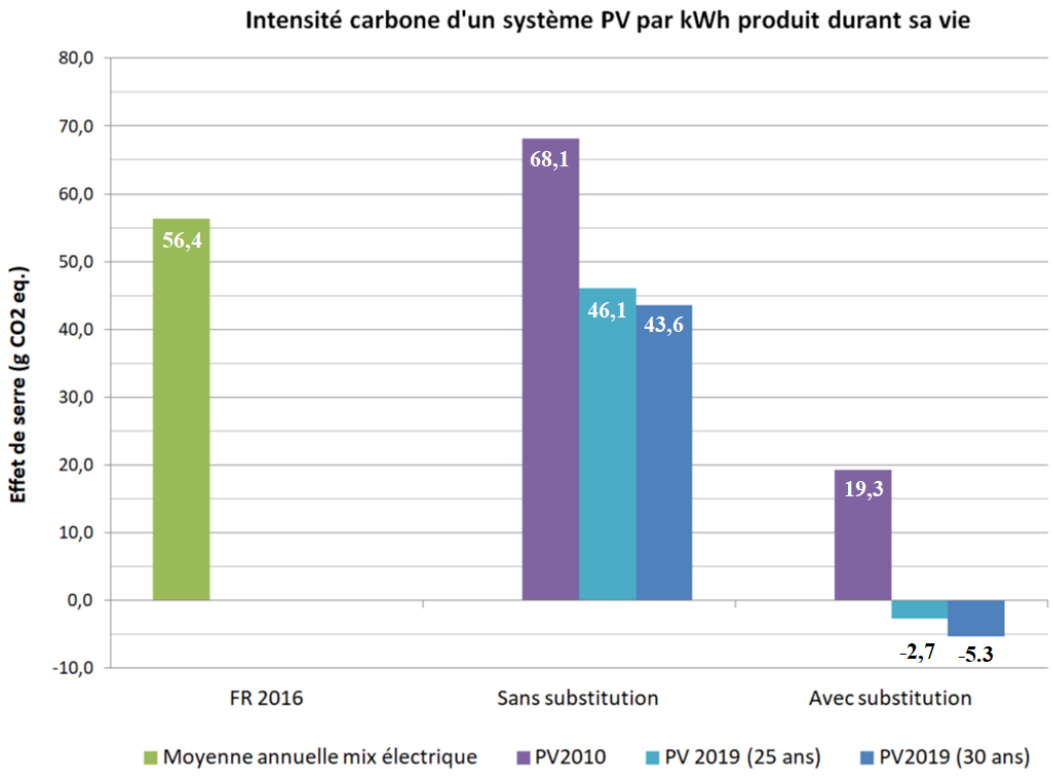


Figure 2.9 – Comparaison de l'intensité carbone d'un kWh produit par un système PV avec différentes hypothèses

Les améliorations technologiques prises en compte dans les données d'inventaire rendent sa performance carbone meilleure que celle du mix moyen avec un impact sans substitution de 43,6 (resp. 46,1) gCO_2eq/kWh pour une durée de vie de 30 (resp. 25) ans. Ces valeurs sont cohérentes avec les données de la littérature : Marini et al. (2014) observent une empreinte carbone de 23,1 gCO_2eq/kWh et Nugent and Sovacool (2014) identifient dans leur revue bibliographique une valeur moyenne de 44,3 gCO_2eq/kWh avec un écart-type de 37,5 gCO_2eq/kWh. Par ailleurs la durée de vie plus longue réduit l'impact du kWh produit puisque le système aura une plus grande production durant sa vie (Nugent and Sovacool, 2014).

En comptant les impacts évités, le système PV apporte des bénéfices environnementaux au bâtiment de l'ordre de 2,7 à 5,3 gCO_2eq/kWh. Un concepteur favorisera donc l'investissement dans l'installation d'un système PV s'il souhaite minimiser l'empreinte carbone d'un projet de bâtiment. Toutefois, le calcul n'a pas pris en compte de dégradation de performance durant la vie du système et les bénéfices sont relativement faibles quelle que soit la durée de vie du système. La prise en compte de cet aspect prospectif sera explorée dans le chapitre 3. Les bénéfices sont bien entendu plus élevés pour des indicateurs comme la consommation d'énergie primaire et la génération de déchets radioactifs.

2.2.2.3 Fuites de fluide frigorigène

Suite au protocole de Montréal de 1989 les fluides frigorigènes de type HCFC (hydrochlorofluorocarbure) sont progressivement interdits. Ils sont désormais remplacés par des fluides frigorigènes qui n'impactent pas la couche d'ozone mais qui possèdent toutefois un fort pouvoir de réchauffement global comme le R410a et le R134a. Ces fluides sont utilisés dans les pompes à chaleur, les climatiseurs, pour la production de froid, à l'échelle domestique et à l'échelle industrielle. Des fuites de fluide frigorigène de ces systèmes peuvent subvenir et avoir des impacts sur le changement climatique. Plusieurs causes peuvent expliquer des fuites durant le cycle de vie d'un système thermodynamique (Bert Metz et al., 2005):

- Les fuites de fluide associées à une mauvaise qualité de conception ou de fabrication, avec des fuites depuis les valves, les joints, la tuyauterie et les échangeurs de chaleur. Elles représentent en moyenne une fuite de 2 à 5 % de la charge initiale de fluide chaque année en fonction du type de système (UNEP, 2003). Une autre étude réalisée au Royaume-Uni identifie un taux de fuite moyen de 3,5 %/an, et des taux de fuites de 1,8 %/an et 10 %/an aux 25ème et 75ème centiles (Department of Energy & Climate Change, 2014).
- Les fuites dues à une mauvaise installation du système et des connections. Elles peuvent émettre de 5 à 100 % de la charge initiale de fluide la première année de son installation.
- Les fuites accidentelles dues à des dysfonctionnements mécaniques ou des composants endommagés qui peuvent causer jusqu'à 100 % de perte du fluide.
- Une évacuation volontaire du fluide dans l'atmosphère durant l'étape d'utilisation ou durant la fin de vie ce qui est interdit dans de nombreux pays. Le taux de fuite dépend de l'action et peut aller d'un faible pourcentage à une perte totale de la charge en fluide.
- Des fuites involontaires durant le traitement de fin de vie du système qui peuvent aller jusqu'à 100 % de la charge.

Pour des pompes à chaleur et climatiseurs domestiques la charge initiale de fluide est de 0,3 à 0,4 kg/kW de puissance installée du système (UNEP, 2011).

La majorité de l'impact carbone du cycle de vie d'un système thermodynamique provient de la consommation d'électricité pour fournir de la chaleur ou du froid. La contribution des fuites à cet impact dépend du type de fluide, des caractéristiques du système et de son usage (puissance, COP, durée de vie, taux d'usage), du mix électrique local et de la gestion en fin de vie. Pour des systèmes domestiques, les fuites peuvent contribuer de 1 à 12 % de l'impact carbone du cycle de vie du système selon Bert Metz et al. (2005), qui calculent plusieurs configurations au Japon, avec une intensité du mix électrique de 378 gCO_2eq/kWh, un usage de 9 mois pour le chaud et le froid, et une durée de vie de 12 ans. La contribution des fuites peut devenir plus importante dans le cas d'un

système qui est peu utilisé dans l'année (p.ex. une climatisation pour l'été dans un pays tempéré) et d'un mix électrique peu carboné.

Des fiches environnementales ont donc été créées pour tenir compte de ces fuites, en prenant comme référence le fluide frigorigène R134a pour lequel des données sont disponibles dans ecoinvent et qui est utilisé dans les données d'inventaire de la pompe à chaleur/climatisation. Les fiches concernent les activités suivantes :

- L'émission de 1 kg de fluide dans l'atmosphère en considérant le flux « *Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a, air* » ;
- Le remplissage du système en fluide frigorigène neuf en comptant 16 % de pertes d'après ecoinvent et en utilisant la fiche ecoinvent : « *market for refrigerant R134a, GLO, refrigerant R134a* » ;
- La récupération et le recyclage du fluide en fin du système avec un taux de récupération de 90 % et 10 % de pertes dans l'atmosphère en considérant la fiche ecoinvent contextualisée en France : « *treatment of used refrigerant R134a, reclamation, GLO, used refrigerant R134a* » ;
- Une substitution de fluide neuf.

Les impacts des différentes étapes du cycle de vie de 1 kg de fluide R134a sont donnés à la Figure 2.10. Cette figure montre l'importance des fuites de fluide en terme d'impact en effet de serre (et par conséquent sur les écosystèmes et la santé humaine) par rapport aux procédés de fabrication et de recyclage. L'intérêt majeur du recyclage (malgré quelques pertes durant son processus) est d'éviter qu'une quantité importante du fluide se retrouve dans l'atmosphère à cause d'une mauvaise gestion de la fin de vie du système thermodynamique. Toutefois, cet effet conséquentiel n'a pas été pris en compte dans les substitutions qui correspondent simplement à la fabrication évitée de fluide neuf équivalent.

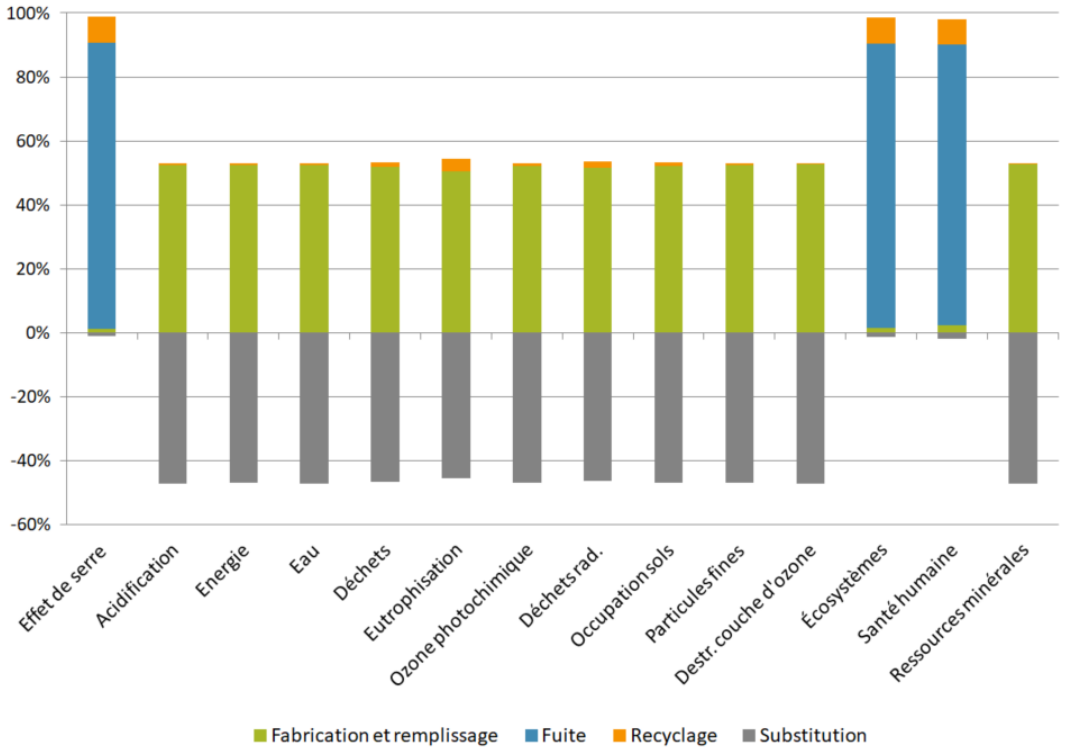


Figure 2.10 – Impacts de différents procédés pour 1 kg de fluide frigorigène R134a

2.2.2.4 Valorisation et recyclage

Les fins de vie des différents éléments du bâtiment se passeront au moins 20 ans après la construction. Des évolutions technologiques auront pu avoir lieu, améliorant les procédés de recyclage ou les taux de valorisation. Sans entrer dans une modélisation prospective précise de ces procédés, les données de fin de vie ont été mises à jour avec les dernières connaissances disponibles avec l'hypothèse que les produits seront recyclés et valorisés autant que possible : la directive cadre européenne sur les déchets de 2008 impose de valoriser 70% des déchets du BTP d'ici 2020 (European Parliament et Council of the European Union, 2008). Une bonne partie de ces modifications se base sur les données de Haupt et al. (2018a), Haupt et al. (2018b) et Meylan et al. (2018).

Valorisation

Les substitutions associées aux fiches de valorisation ont été mises à jour pour correspondre aux données environnementales des Tableau 2.5 et Tableau 2.6.

Tableau 2.5 – Contenu énergétique de différents produits

Produit	UF	Contenu énergétique (MJ/UF)	Source
Polystyrène	1 kg	38,5	ecoinvent
Bois	1 kg	20	ecoinvent
PVC	1 kg	21,5	ecoinvent
Verre	1 kg	0,1423	ecoinvent
Peinture/colles	1 kg	10,5	ecoinvent
Toxiques	1 kg	12,8	(Haupt et al., 2018b)
Papiers	1 kg	14,46	(Haupt et al., 2018b)
Plastiques	1 kg	30,79	(Haupt et al., 2018b)

Tableau 2.6 – Taux de valorisation de la cogénération en incinération de déchets

Cogénération		Source
Valorisation chaleur	79 %	(Meylan et al., 2018)
Valorisation électricité	21 %	

Recyclage

Les taux d'efficacité du recyclage ont été mis à jour (Tableau 2.7). Un procédé de recyclage de la paille a été ajouté. Son recyclage produit la moitié de sa masse en compost qui permet à son tour de substituer des fertilisants, de la paille primaire et de la tourbe. Le recyclage du fluide frigorigène en fin de vie a également été ajouté. Lors de ce recyclage il se produit une perte de 10 % du fluide vers l'atmosphère et 90 % du fluide usé est récupéré.

Tableau 2.7 – Efficacité et substitution de procédés de recyclage

	Efficacité du recyclage	Co-produit	Substitutions	Source
Cuivre	76%	Cuivre secondaire	Cuivre primaire	Haupt et al. (2018a)
Acier	90%	Acier secondaire	Acier primaire	Haupt et al. (2018a)
Aluminium	99%	Aluminium secondaire	Aluminium primaire	Haupt et al. (2018a)
Compostage Paille	50%	Composte	Fertilisants, paille, tourbe	Haupt et al. (2018a)
Fluide frigorigène	90% (10% de pertes de fluide)	Fluide utilisé	Fluide neuf	ecoinvent

Les fins de vies des menuiseries ont été mises à jour avec ces nouvelles données et selon les quantitatifs du Tableau 2.8.

Tableau 2.8 – Fins de vie de plusieurs compositions

		UF	Masse (kg)	Part	Fin de vie
Composition	PVC simple vitrage	1 m²	18,98		
Entrées	PVC		9,5	35%	Valorisation
	Verre		7,5	27%	Valorisation
	Acier		1,98	7%	Recyclage
Composition	PVC double vitrage	1 m²	27,38		
Entrées	PVC		10,4	38%	Valorisation
	Verre		15	55%	Valorisation
	Acier		1,98	7%	Recyclage
Composition	PVC triple vitrage	1 m²	35,88		
Entrées	PVC		11,4	32%	Valorisation
	Verre		22,5	63%	Valorisation
	Acier		1,98	6%	Recyclage
Composition	Porte bois extérieure	1 m²	19,5		
Entrées	Bois		19,5	100%	Valorisation
Composition	Porte bois intérieure	1 m²	13		
Entrées	Bois		13	100%	Valorisation

2.2.2.5 Fin de vie des produits et systèmes

Dans la version initiale d'EQUER il n'existait pas jusqu'à présent de fiches de fin de vie des systèmes. Des données ont été ajoutées pour les systèmes solaires PV et thermique, la pompe à chaleur et le ballon de stockage.

Pour le panneau solaire PV, une fiche de recyclage de première génération a été créée à partir des données d'inventaire fournies par Stolz et Frischknecht (2016). Le

recyclage de première génération correspond au recyclage du cuivre, de l'aluminium et du verre ; les cellules en silicium sont incinérées. Concernant les autres systèmes, des fiches de fin de vie génériques ont été produites en récupérant les quantitatifs des matériaux les plus constitutifs à partir des fiches de fabrication d'ecoinvent, puis les fins de vie adéquates ont été appliquées à ces composants. Les quantitatifs des systèmes sont donnés dans les Tableau 2.9, Tableau 2.10, Tableau 2.11.

Tableau 2.9 – Composition et fin de vie du système solaire thermique

		UF	Masse (kg)	%	Fin de vie
Composition	Système solaire thermique	1 m²	35,75		
Entrées	Aluminium		3,94	11,03%	Recyclage
	Acier		3,61	10,10%	Recyclage
	Cuivre		7,80	21,81%	Recyclage
	Propylène glycol		4,29	11,98%	Valorisation
	Verre solaire		9,12	25,51%	Valorisation
	Laine de roche		0,61	1,70%	Déchet inerte
	PVC		0,02	0,05%	Valorisation
	Fer		0,75	2,10%	Recyclage
	Carton		3,81	10,64%	Valorisation
	Plastiques		1,80	5,04%	Valorisation
	Peinture		0,02	0,05%	Valorisation
Fiche ecoinvent	« solar collector system installation, Cu flat plate collector, one-family house, hot water » (la fiche correspondant au ballon de stockage est soustraite)				

Tableau 2.10 - Composition et fin de vie de la pompe à chaleur

		UF	Masse (kg)	%	Fin de vie
Composition	Pompe à chaleur	10 kW	35,75		
Entrées	Acier		95	16,8 %	Recyclage
	Cuivre		22	0,8 %	Recyclage
	Élastomère		10	2,4 %	Valorisation
	Fluide frigorigène R134a		3,1	72,5 %	Recyclage
	PVC		1,0	7,6 %	Valorisation
Fiche ecoinvent	« heat pump, brine-water, 10kW » ou 1/3 de « heat pump production, 30kW » (mêmes données d'inventaire)				

Tableau 2.11 - Composition et fin de vie du ballon de stockage

		UF	Masse (kg)	%	Fin de vie
Composition	Ballon de stockage	600 L	283		
Entrées	Acier		260	91,9 %	Recyclage
	Laine de verre		20	7,1 %	Recyclage
	Peinture		1,0	0,4 %	Valorisation
	PVC		2,0	0,7 %	Recyclage
Fiche ecoinvent	« hot water tank production, 600l »				

Les figures suivantes permettent de comparer les impacts de fabrication et de fin de vie des systèmes. Les bénéfices associés au recyclage et à la valorisation sont comptés avec la méthode 50/50 (voir 2.1.2.2). Concernant le système solaire PV (Figure 2.11), le recyclage

de 1ère génération a des impacts et des bénéfices environnementaux peu significatifs sur la majorité des indicateurs. Sur les déchets radioactifs il produit des impacts équivalents à 17 % de la fabrication à cause de la consommation d'électricité du procédé de recyclage. La fin de vie du système solaire thermique (Figure 2.12) apporte globalement des bénéfices environnementaux dont les plus significatifs, comparés aux impacts de fabrication, sont sur l'énergie primaire, les ressources minérales et les déchets radioactifs. Concernant la fin de vie de la pompe à chaleur (Figure 2.13) elle produit des impacts sur les indicateurs d'effet de serre, de dommages aux écosystèmes et à la santé humaine de l'ordre de 12 % à 22 % des impacts de la fabrication. Elle apporte toutefois des bénéfices sur les indicateurs de destruction de la couche d'ozone et d'épuisement des ressources minérales avec respectivement 44 % et 32 % des impacts de la fabrication. Enfin concernant le ballon de stockage (Figure 2.14), la fin de vie a des impacts significatifs en termes de déchets radioactifs et de santé humaine, avec respectivement 20 % et 23 % des impacts de la fabrication. Elle procure des bénéfices environnementaux qui dépassent 10 % des impacts de la fabrication dans plusieurs indicateurs : l'effet de serre, l'acidification, les déchets, l'ozone photochimique, les particules fines, les dommages aux écosystèmes, et particulièrement l'épuisement des ressources avec un bénéfice de 36 % des impacts de la fabrication. Cette analyse montre la diversité des impacts ou bénéfices qui résident dans les fins de vie avec des contributions qui peuvent atteindre 40 % de l'impact en fabrication. Des méthodes d'analyse de contribution par procédés et par indicateur de niveau endpoint permettraient de mieux comprendre les origines des impacts et des bénéfices. La prise en compte de ces fins de vie améliore globalement la représentativité de l'inventaire. Un état de l'art des travaux en ACV sur les fins de vie et sur le recyclage de 2ème génération des systèmes PV pourrait encore améliorer ces données.

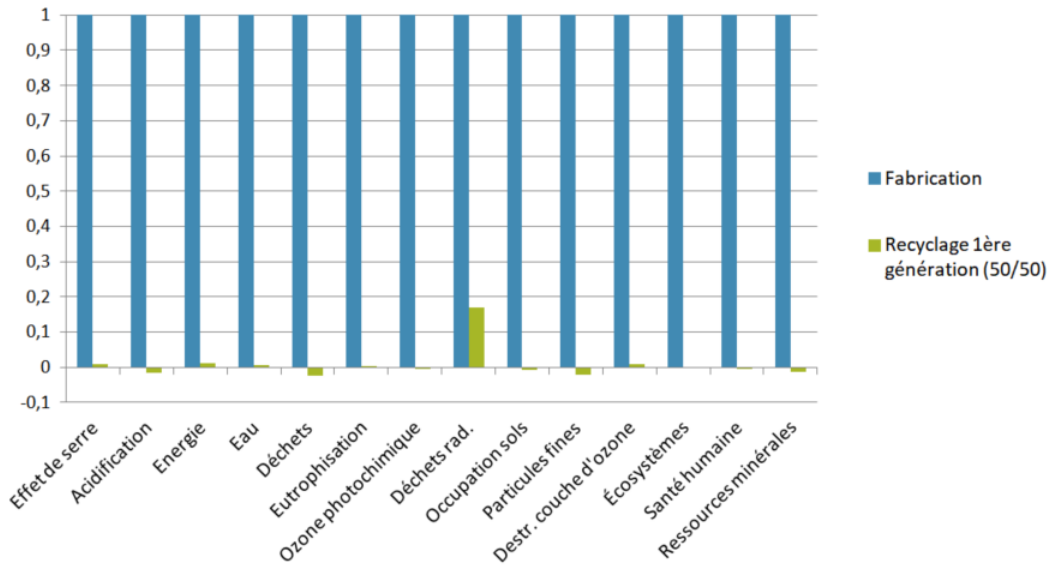


Figure 2.11 – Comparaison des impacts de fabrication et de fin de vie d'un système solaire PV. Unité fonctionnelle de 1 m²

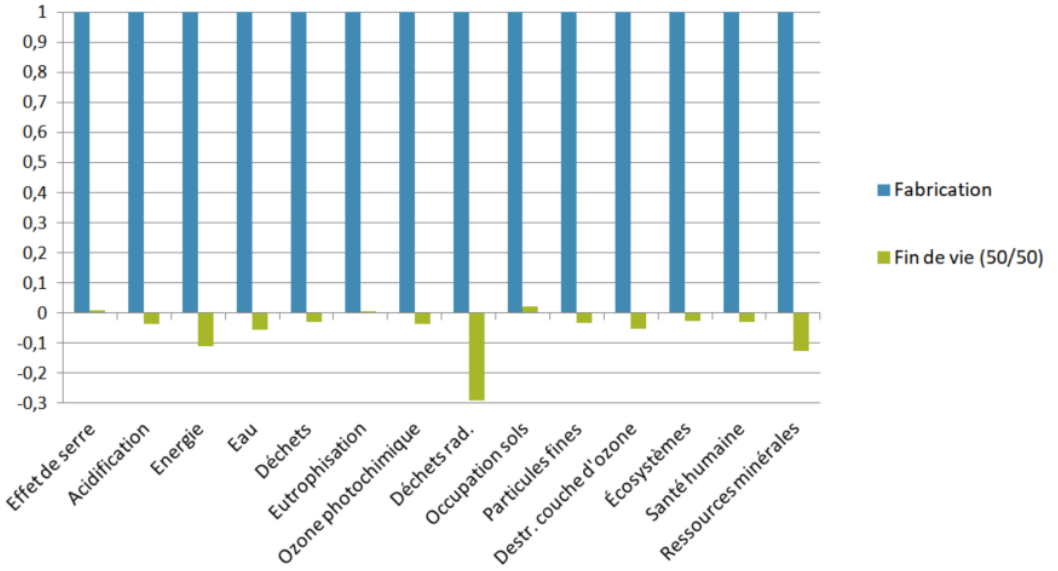


Figure 2.12 – Comparaison des impacts de fabrication et de fin de vie d'un système solaire thermique. Unité fonctionnelle de 1 m²

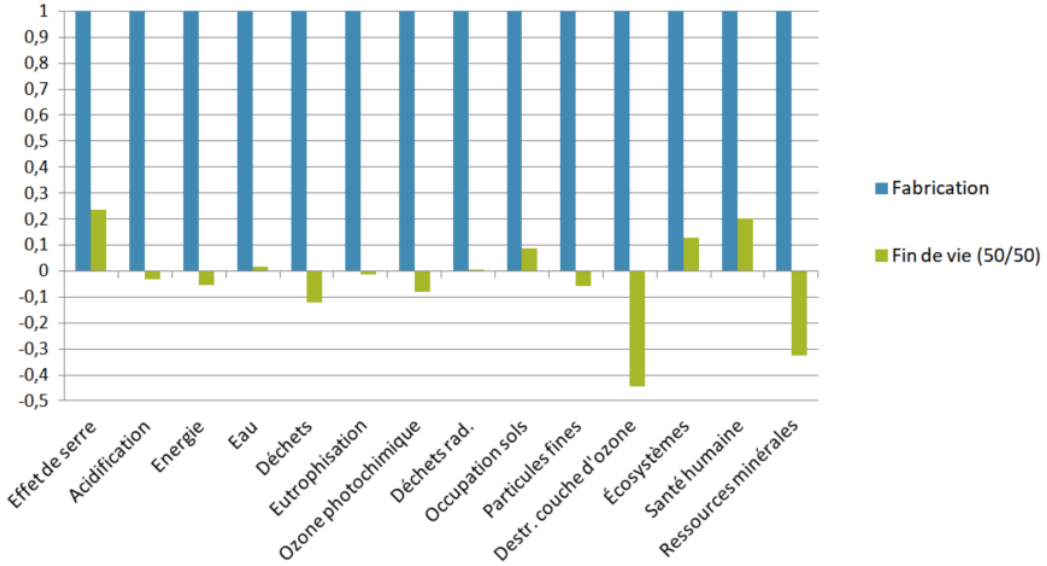


Figure 2.13 – Comparaison des impacts de fabrication et de fin de vie d'une pompe à chaleur. Unité fonctionnelle de 1 kW

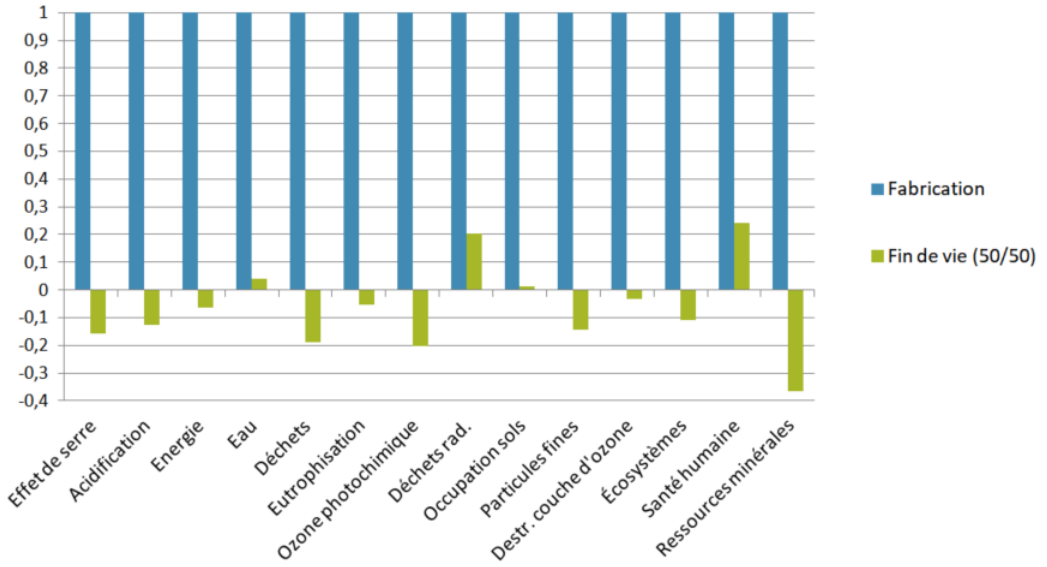


Figure 2.14 – Comparaison des impacts de fabrication et de fin de vie d'un ballon de stockage. Unité fonctionnelle de 1 L

2.2.3 Échantillonnage de la population initiale

En optimisation génétique multicritère la population initiale est généralement créée à partir de tirages aléatoires des individus dans l'espace de décision. Le défaut du tirage aléatoire est qu'il peut exister des « amas » de solutions similaires dans une même zone de l'espace alors qu'une diversité maximale des individus est préférable au début d'une optimisation multicritère (Evins, 2015). La méthode d'échantillonnage quasi-aléatoire par séquence de Sobol est implémentée dans l'algorithme (Sobol, 1967). C'est une méthode déterministe, à faible discrépance qui construit une suite de points de manière à couvrir uniformément l'espace et à éviter les « amas » de points. La Figure 2.15 montre la comparaison entre des tirages aléatoires et des tirages par séquences de Sobol pour différents nombres d'échantillons. On observe la meilleure uniformité des points issus d'une séquence de Sobol par rapport aux tirages aléatoires.

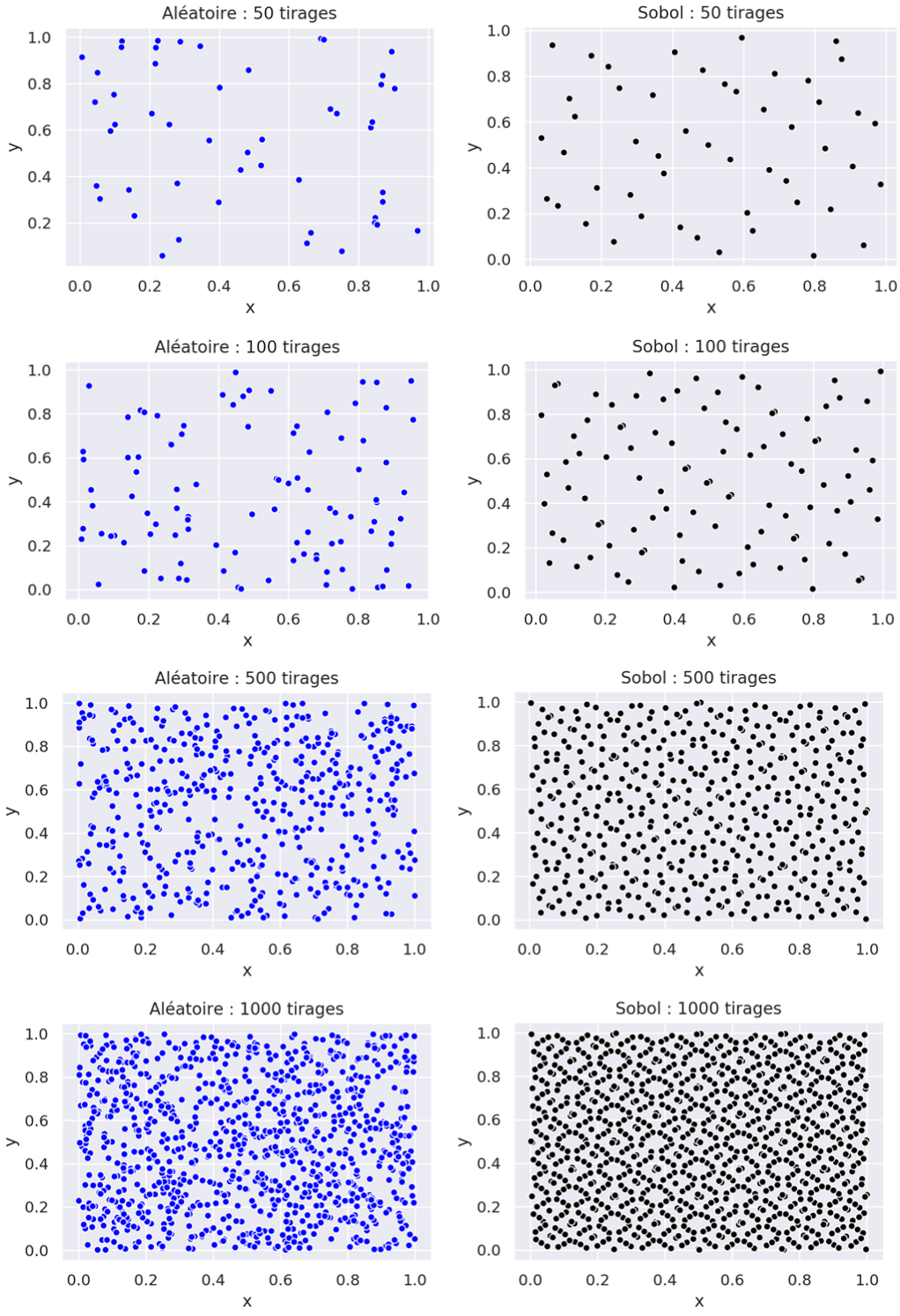


Figure 2.15 – Comparaison de tirages aléatoires et de séquences de Sobol

2.3 Cas d'étude

2.3.1 Contexte

Un cas d'étude nous a été fourni dans le cadre du projet européen A-ZEB (« Affordable Zero-Energy Building »), financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne (*Grant agreement* N° 754174). Ce projet a regroupé des bureaux d'études, des constructeurs et des chercheurs de divers Pays d'Europe (Allemagne, Pays-Bas, Espagne, Italie, Bulgarie, France) avec l'objectif de créer une méthodologie complète afin de limiter les surcoûts des bâtiments zéro-énergie à toutes les étapes de leur cycle de vie et de rendre ce type de bâtiment plus abordable.

2.3.2 Présentation du cas d'étude

Le cas d'étude est une maison passive familiale de 200 m² située dans une zone rurale bulgare (Figure 2.16). Le standard passif implique les critères suivants :

- Des besoins de chauffage (avec une consigne à 20°C) inférieurs à 15 kWh/(m².an)
- Une consommation d'énergie primaire inférieure à 120 kWh/(m².an)
- Une étanchéité d'enveloppe $n50 \leq 0{,}6\ h^{-1}$
- Moins de 10 % d'heures de surchauffe annuelle (> 25°C).

Ces exigences ont été vérifiées par le constructeur avec les calculs effectués selon la méthode PHPP (Feist et al., 2007). Le constructeur a fourni les plans détaillés, la feuille de calcul PHPP et des informations sur les coûts de construction afin de réaliser le modèle de SED sur Pleiades+COMFIE.

Dans le cadre de cette thèse, le cas d'étude a été « relocalisé » en France afin de garantir la pertinence de la méthodologie et des modèles employés. Le modèle de mix électrique, les fiches environnementales de la base de données et le modèle stochastique d'occupation ont été conçus pour le contexte français, leur application à un contexte bulgare n'est pas pertinente.

Figure 2.16 – Vue architecturale et photos du cas d'étude situé à Plovdiv, Bulgarie

2.3.2.1 Localisation

La maison a été arbitrairement relocalisée en Île-de-France avec le fichier météorologique RT H1A de Trappes (78) et les coordonnées géographiques de Palaiseau (91) (Tableau 2.12). La maison réelle est située sur la face nord d'une colline dont l'inclinaison estimée à 14° engendre un masque solaire ; cette configuration locale est conservée (Figure 2.17). Une altitude du site est choisie à 108 m ce qui est réaliste pour la région.

Tableau 2.12 - DJU fichier météorologique RT2012 H1a à Trappes

DJU	
Période de chauffage	1933
Période de climatisation	205

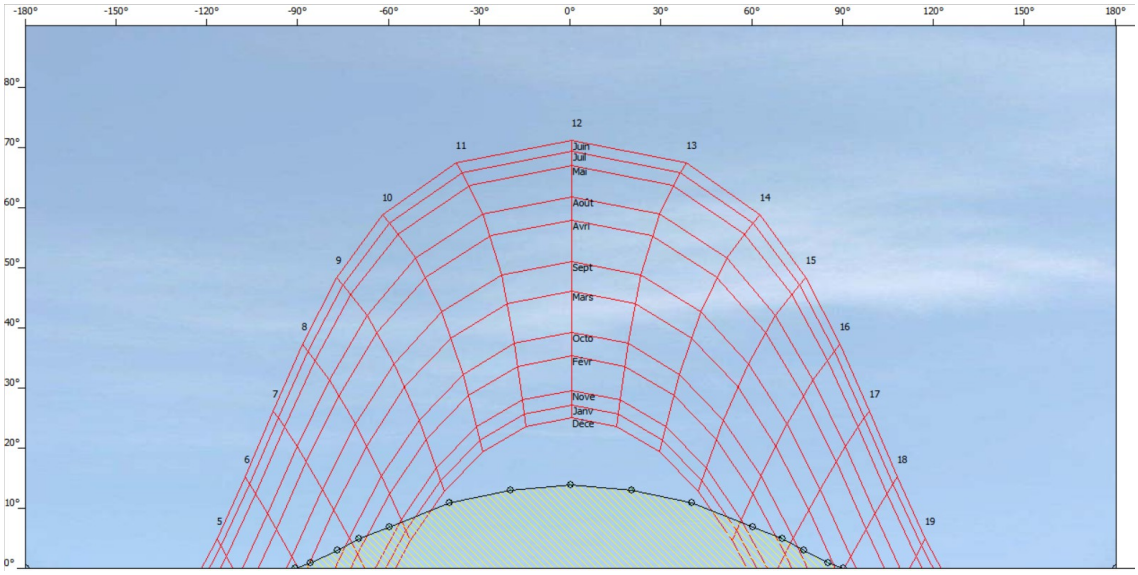


Figure 2.17 – Masque solaire vu depuis la façade Sud

2.3.2.2 Morphologie

Le bâtiment est un R+2 avec un grenier ventilé. Le RDC et le R+1 sont mitoyens d'un vide sanitaire ménagé dans la colline. Les contacts avec le sol de certaines parois verticales ont été considérés dans la modélisation.

D'un point de vue architectural, deux suites d'étages, l'une côté Ouest et l'autre Est, sont disposées en quinconce comme illustré sur le plan de coupe en Figure 2.18.

La surface totale au sol est de 471 m² et la surface habitable est de 205 m². Le bâtiment comporte les pièces suivantes : une cuisine + salon, trois chambres, un WC, deux salles de bain, deux pièces de bureau, une pièce technique, une entrée principale, un garage. Le bâtiment dispose d'un ascenseur qui n'est pas compris dans l'unité fonctionnelle en ACV.

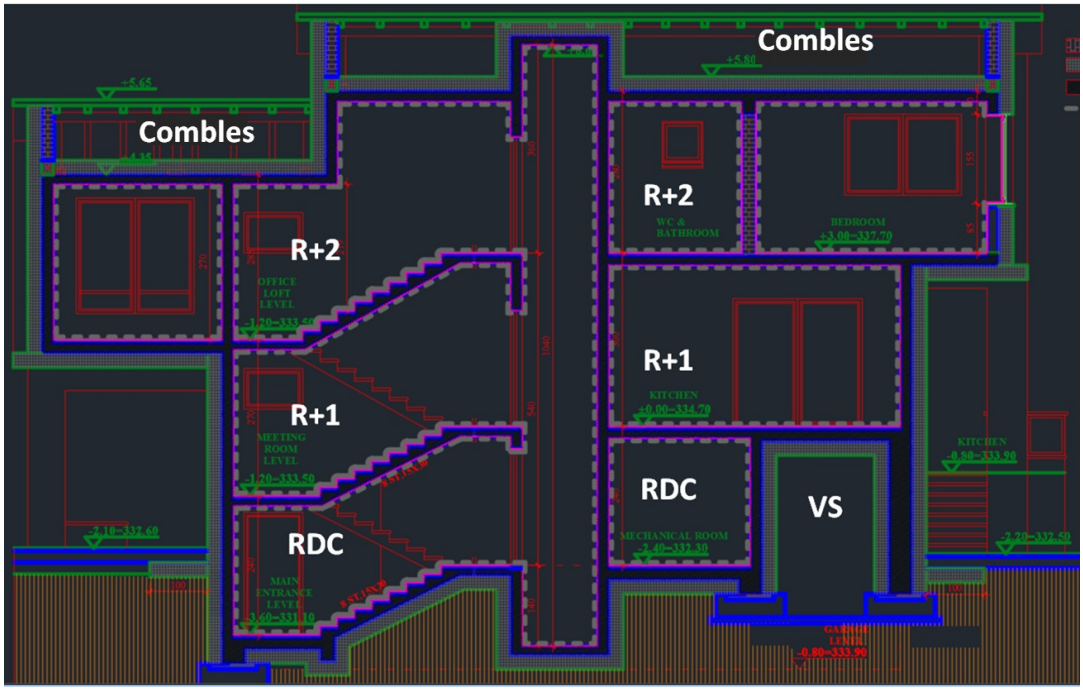


Figure 2.18 - Plan de coupe, visualisation des étages en quinconce. En gris l'épaisseur d'isolant et en noir l'épaisseur de béton (VS = vide-sanitaire).

2.3.2.3 Enveloppe

La structure est essentiellement en béton ; seuls les murs extérieurs des combles sont en briques de terre cuite. Toutes les parois sont isolées par l'extérieur (ITE) avec 25 cm de polystyrène expansé (EPS). Le plancher sur terre-plein et le plancher sur vide sanitaire sont isolés par du polystyrène extrudé (XPS). L'isolation est décrite en détails dans le Tableau 2.13. Un enduit minéral recouvre les parois extérieures.

Tableau 2.13 - Détails de l'isolation de l'enveloppe

Parois	Isolant	Épaisseur	Caractéristiques
Plancher sur terre-plein	XPS Top 30 Austrotherm	25 cm	λ = 0,036 W/(m.K)
Plancher sur vide sanitaire			ρ = 30 kg/m3
			c = 1450 J/(kg.K)
Mur extérieur	EPS-F Austrotherm	25 cm	λ = 0,031 W/(m.K)
Mur intérieur sur LNC			ρ = 25 kg/m3
Plancher combles			c = 1380 J/(kg.K)
Toiture terrasse (RDC)			
Mur extérieur combles			

2.3.2.4 Vitrages

Les fenêtres sont en triple vitrage à cadre PVC, avec une coefficient de transmission thermique Uw = 0,85 W/(m².K) et un facteur solaire Sw = 0,42. Les ratios de surface vitrée par orientation des façades sont donnés dans le Tableau 2.14.

Tableau 2.14 - Taux de vitrage des façades

Orientation	Ratio surface vitrée/surface de façade
Nord	16 %
Sud	45 %
Est	22 %
Ouest	2 %

2.3.2.5 Systèmes

Le bâtiment est équipé des systèmes suivants :

- Une pompe à chaleur air/eau modèle « DAIKIN ALTHERMA model ERLQ004CV3 » d'une puissance de 4,4 kW et alimentée par électricité assure le chauffage et l'appoint de l'eau chaude sanitaire (ECS). Le chauffage est par soufflage d'air chaud. Le COP à 7°C est de 3,52 et le COP opérationnel annuel de 3,69.
- Une surface de 4,62 m² de capteur solaire thermique assure en priorité l'ECS. Le capteur a un rendement optique de 76 %.
- Un ballon de stockage de 300 L avec un coefficient de pertes thermiques de 3,2 W/K.
- Une production d'électricité est assurée par des panneaux solaires photovoltaïques de type silicium polycristallin. Vingt modules pour une surface de 33 m² sont disposés en toiture pour une puissance crête de 5 kWc.
- Comme souvent dans les maisons passives, une VMC double flux est installée. Elle possède une efficacité d'échangeur de 84 % selon le Passive House Institute dont le calcul se base sur la différence de température entre l'air extrait et l'air rejeté, et de 96 % selon la norme NF 205 dont le calcul provient de la norme EN 13141-7 et se base sur l'air soufflé et l'air extérieur neuf. Alors que la mesure expérimentale du rendement montrait un écart avec celui affiché et basé sur la norme EN 13141-7, la méthode de calcul du *Passive House Institute* a été établie pour mieux refléter le rendement réel d'un échangeur. Le rendement de 84 % est donc celui qui est utilisé dans la modélisation pour son meilleur réalisme.

2.3.2.6 Données du PHPP

Les hypothèses de modélisation ont été enrichies de données provenant de la feuille de calcul PHPP. Elles concernent notamment :

- Les ponts thermiques des parois (Tableau 2.15). Les ponts thermiques des fenêtres ont été omis involontairement et constituent une limite au cas d'étude ;
- Les longueurs et isolations des réseaux de distribution de chauffage et d'ECS ;

Les débits de ventilation et les infiltrations d'air (

- Tableau 2.16) ;
- Les caractéristiques techniques de certains systèmes.

Tableau 2.15 - Ponts thermiques

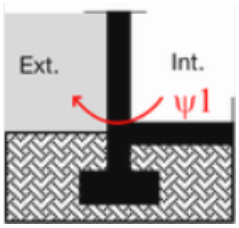
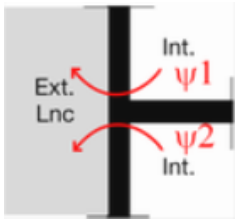
Pont thermique linéique	Psi (Ψ)	Schéma
Plancher bas sur terre-plein	$\Psi_1 = 0,1$ W/(K.m)	
Plancher intermédiaire	$\Psi_1 = 0,05$ W/(K.m) $\Psi_2 = 0,05$ W/(K.m)	

Tableau 2.16 - Infiltrations d'air

Zone thermique	Débit d'infiltration
Locaux chauffés et local non-chauffé isolé	0,03 vol/h
Locaux non-chauffés non-isolés (garage, combles, vide sanitaire)	0,1 vol/h

2.3.3 Modélisation en SED et en ACV

2.3.3.1 Hypothèses simplificatrices

L'architecture en quinconce du bâtiment (présentée en section 2.3.2.2) complique la saisie du plan et du modèle sur Pleiades en obligeant à créer des demi-niveaux fictifs. Par souci de simplification le choix a été fait d'aligner les étages entre eux tout en veillant à ne pas modifier les volumes ni les surfaces déperditives.

Les nombreuses fenêtres voisines ont été rassemblées par étage, par orientation et par zone thermique pour plusieurs raisons. D'abord cela permet de réduire le nombre de variables de décision en passant de 17 à 9 fenêtres globales (Figure 2.19). Cela permet aussi de réduire la complexité du problème d'optimisation et facilite la convergence vers l'optimum global. Enfin les solutions issues de l'optimisation sont plus cohérentes architecturalement, par exemple elles ne comportent pas de double vitrage et de triple vitrage sur la même façade.

2.3.3.2 Zonage thermique

Le bâtiment est découpé en 4 zones thermiques : la zone jour qui regroupe les pièces utilisées principalement la journée, la zone nuit qui regroupe les chambres et deux zones de locaux non-chauffés (LNC), l'une pour les LNC non-isolés et l'autre pour les LNC isolés et étanches (Figure 2.20).

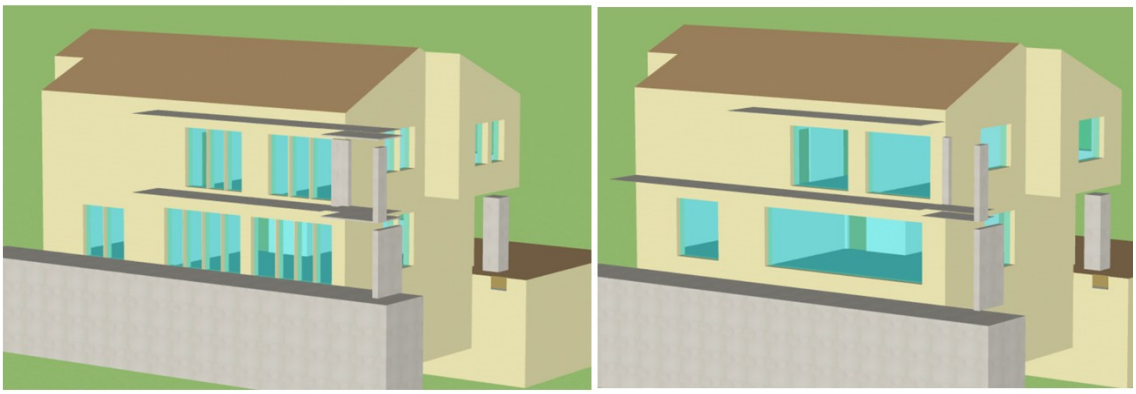


Figure 2.19 - Simplification des vitrages. Gauche : 17 fenêtres, droite : 9 fenêtres

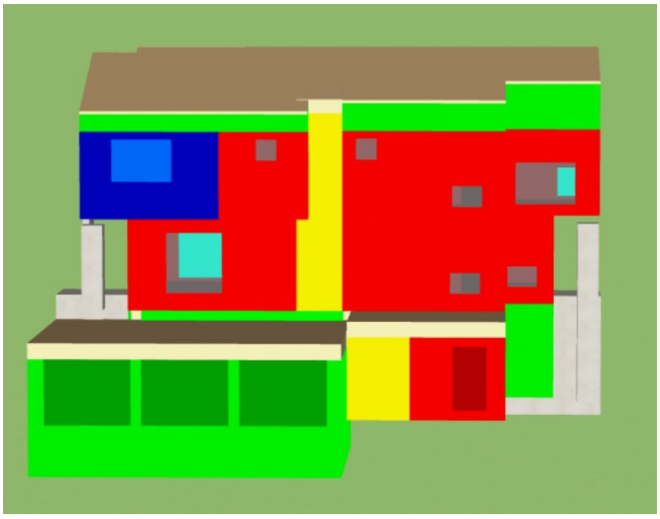


Figure 2.20 - Zonage thermique. Rouge : zone jour, bleu : zone nuit, jaune : LNC étanches, vert : LNC non-étanches

2.3.3.3 Scénarios d'occupation

Des scénarios annuels moyens concernant les températures de consigne, l'occupation, la consommation d'eau chaude sanitaire et les puissances dissipées ont été générées grâce au modèle d'occupation stochastique de Vorger (2014). Ce modèle requiert des informations concernant les occupants et les pièces de chaque zone. Les scénarios de puissances dissipées sont générés pour chaque semaine et chaque type d'utilisation de l'électricité : audiovisuel, cuisson, éclairage, froid, informatique, lavage, résiduel. Dans les scénarios générés, la température moyenne est de 20,3°C en zone Jour et de 18,5°C en zone Nuit.

Un scénario d'ouverture des fenêtres simule le comportement des occupants en été avec un débit de ventilation extérieure qui passe à 10 vol/h lorsque la température intérieure est supérieure à 24°C et que la température extérieure lui est inférieure de 2°C.

2.3.3.4 Quantitatif des éléments et composition des parois

Le quantitatif de tous les éléments constitutifs du bâtiment et les détails des compositions des parois sont donnés en Annexe A. et en Annexe F.

2.3.3.5 Objectifs et champ de l'étude ACV

L'unité fonctionnelle associée au cas d'étude est le logement d'une famille de 4 personnes dans une maison individuelle d'une durée de vie de 80 ans, dans les conditions de confort préconisées par le standard de la maison passive, et la production d'électricité sur le réseau. Elle est représentée par une unité de 1 m² de surface habitable (SHAB). Le cas d'étude comporte également une salle de réunion, cependant son intégration à l'unité fonctionnelle du logement est simplifiée en la considérant comme un salon classique.

Le bâtiment est étudié dans le cadre de sa phase de conception. Toutes les étapes du cycle de vie du bâtiment sont prises en compte et incluent les aspects suivants :

- Étape de construction : la production des composants de la maison (avec un surplus perdu de 5%), des équipements et leur transport des usines jusqu'au site.
- Étape d'utilisation : la consommation d'énergie pour le chauffage, la climatisation et la préparation de l'eau chaude sanitaire, la consommation d'électricité des occupants pour l'éclairage, les appareils électroménagers et les auxiliaires des systèmes. La production d'électricité via les panneaux solaires photovoltaïques. La consommation d'eau froide, le traitement des eaux usées, le traitement des déchets ménagers et les transports des occupants ne sont pas pris en compte car ils ne sont pas influencés par l'espace de décision en phase de conception.
- Étape de rénovation : le traitement de fin de vie et le remplacement à l'identique des composants lors de leur fin de vie avec prise en compte de leur transport.
- Étape de déconstruction : le traitement de fin de vie des composants en fin de vie du bâtiment avec prise en compte des transports vers les sites de fin de vie (décharge, incinération et recyclage).

Les méthodes de caractérisation et les données utilisées sont celles présentées à la section 2.2. Les données moyennes de la technosphère sont utilisées. Les données de mix électrique attributionnel horaire sont générées avec les capacités installées du début de l'année 2020 et ont une intensité carbone moyenne annuelle de 49 gCO_2eq/kWh. L'ACV est donc attributionnelle bien qu'une approche conséquentielle soit plus adaptée dans un contexte décisionnel. L'export d'électricité dans le réseau est inclus dans les frontières du

système. Des impacts évités de l'électricité sont attribués par substitution de l'électricité produite sur le réseau. Les co-produits issus de la valorisation et du recyclage sont inclus dans les frontières du système, ils induisent des substitutions et le comptage d'impacts évités selon la règle des 50/50.

Les fuites de la pompe à chaleur sont prises en compte avec les hypothèses suivantes :

- Une charge initiale de fluide R134a de 0,31 kg/kW, soit 1,36 kg de fluide ;
- Un taux de fuite de la charge courante de 3,5 %/an durant l'étape d'utilisation ;
- Un remplissage à la moitié de la durée de vie (13 ans) qui compte dans l'étape de rénovation. Le remplissage consiste à vider entièrement et recycler le fluide restant puis à remplir de fluide la PAC, quelques pertes sont liées à ce processus comme détaillé en section 2.2.2.3 ;
- Le recyclage du fluide fait partie de la fin de vie de la PAC.

Les durées de vies suivantes sont considérées :

- 30 ans pour les portes et les fenêtres ;
- 30 ans pour les modules photovoltaïques et les capteurs solaires thermiques ;
- 25 ans pour la pompe à chaleur ;
- 20 ans pour le ballon de stockage ;
- 80 ans pour les autres éléments et le bâtiment dans son ensemble.

Les distances de transport suivantes sont considérées :

- Site de production vers chantier : 100 km ;
- Site à la décharge inerte en fin de vie : 20 km ;
- Site à l'incinérateur : 50 km ;
- Site au centre de recyclage : 100 km.

Les scénarios de fins de vie suivants sont considérés :

- Matériaux bio-sourcés, plastiques, polystyrène : valorisation ;

- Béton : recyclage en gravats ;
- Métaux : recyclage ;
- Plâtre, laine de roche, briques, carrelage, enduits minéraux : décharge inerte.

2.3.3.6 Résultats de la SED

Enveloppe

Les besoins de chauffage s'élèvent à 2129 kWh/an, soit 10,4 kWh/(m².an) pour des conditions météo de 1933 degrés-jours (DJU base 18). Le diagramme de Sankey permet d'analyser la performance bioclimatique de l'enveloppe par la part de ses besoins thermiques bruts et des gains solaires valorisés (Figure 2.21).

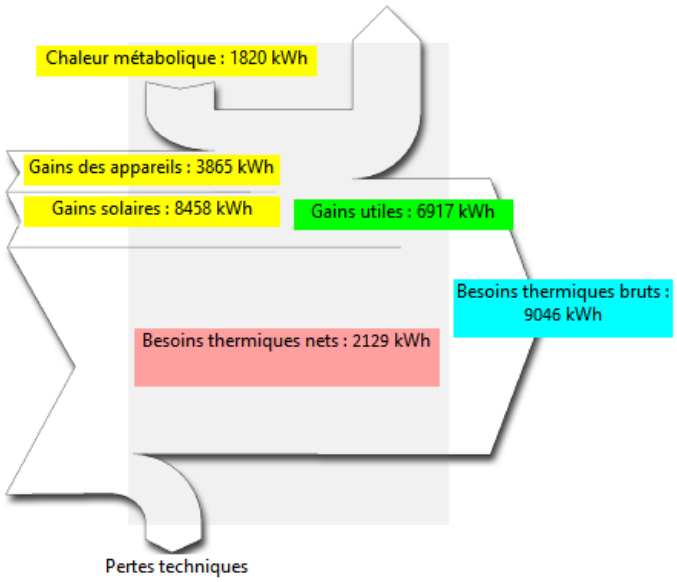


Figure 2.21 - Diagramme de Sankey des besoins chauds de l'enveloppe

Confort thermique

Le confort est évalué en fonction de la température opérative de chaque zone thermique, en considérant une approche de confort adaptatif tenant compte de la température extérieure des jours précédents, cf. le diagramme de Brager (Figure 2.22). La zone de Brager permet de déterminer l'intervalle de température intérieure qui est confortable par rapport à la température extérieure. Le taux de confort est défini comme le

pourcentage d'heures situées dans la zone de Brager. Pour la zone Jour ce taux est de 94,28 % et pour la zone Nuit de 92,65 %. L'analyse du diagramme montre que l'inconfort provient principalement d'une surchauffe en hiver avec une température intérieure trop élevée quand il fait entre 2°C et 9°C à l'extérieur. Dans une moindre mesure, un inconfort peut provenir d'une température intérieure « trop fraîche » en été entre 23°C et 25°C, pour des températures extérieures supérieures à 25°C et 30°C. Toutefois cet inconfort peut paraître peu problématique en pratique.

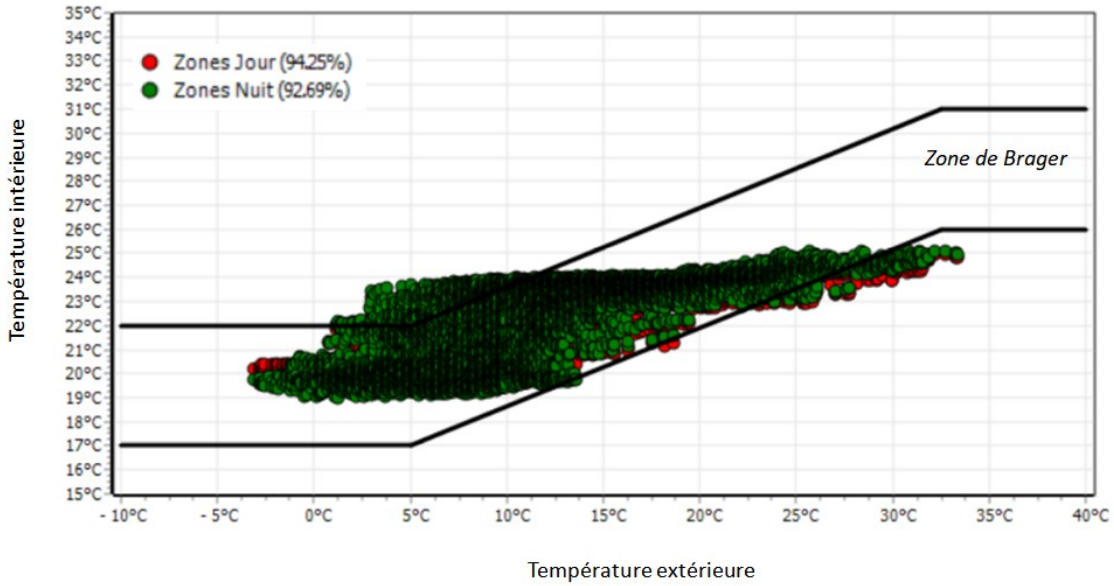


Figure 2.22 - Diagramme de Brager et taux de confort

Consommations et systèmes

L'électricité est le seul vecteur d'énergie finale mis en jeu dans le bâtiment. Dans la suite les termes de « consommation » et de « production » font donc implicitement référence à de l'électricité.

Les consommations par poste sont données dans le Tableau 2.17. Les postes de consommations comprennent le chauffage, l'ECS non couverte par de la production solaire thermique, les appareils qui comprennent aussi l'éclairage, les auxiliaires de distribution (pompe) et de ventilation. Les faibles besoins de chauffage et le COP de 3,5 de la PAC aboutissent à des consommations de chauffage très faibles de l'ordre de 577 kWh/an, soit

2,8 kWh/m².an. Les capteurs thermiques fournissent 44 % de l'énergie annuelle nécessaire à l'ECS. Le reste de l'ECS est fourni par la PAC avec un COP de 2,3 ce qui aboutit à 1240 kWh/an (6,4 kWh/m².an).

Tableau 2.17 – Consommations et production PV du cas d'étude

	Chauffage	ECS	Appareils	Distribu-tion	Auxiliaire ventilation	Production PV	Total
kWh/m².an	2,8	6,1	18,9	1,5	3,8	22,9	8,7

Le détail des contributions de chaque poste de consommation est donné à la Figure 2.23. La consommation brute d'électricité s'élève à 6776 kWh/an (33 kWh/m².an) dont 57 % proviennent de la consommation des appareils et de l'éclairage. Le chauffage compte pour seulement 9 % de ces consommations. La production photovoltaïque de 4688 kWh/an (22,9 kWh/m².an) couvre 69 % de la consommation brute d'électricité. La consommation nette d'énergie finale est donc de 1780 kWh/an d'électricité, soit 8,7 kWh/(m².an), ce qui en fait un bâtiment très performant mais qui ne respecte pas encore le niveau zéro-énergie.

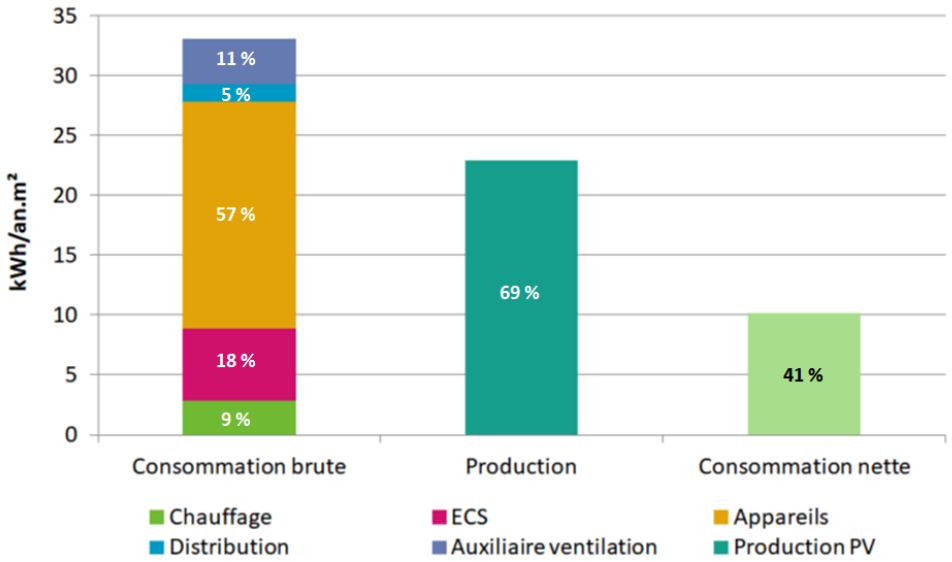


Figure 2.23 – Détails des postes de consommation d'électricité, de la production et de la consommation nette et pourcentages de la consommation brute totale.

2.3.3.7 Résultats de l'ACV

L'analyse de cycle de vie est réalisée avec les hypothèses énoncées en section 2.3.3.5. Les impacts du cycle de vie par unité fonctionnelle et par an sont indiqués dans le Tableau 2.18.

Tableau 2.18 – Impacts/m².an du cycle de vie du cas d'étude

Indicateur d'impact	Unité	Total/m².an
Acidification terrestre et aquatique	kg SO_2 éq.	9,8E-05
Déchets produits	kg	21,4
Déchets radioactifs	m3	7,9E-07
Demande cumulative d'énergie	MJ	286,5
Destruction de l'ozone stratosphérique	kg CFC-11 éq.	2,7E-06
Eau utilisée	m^3	1,3
Effet de serre GWP100a	kg CO_2 éq.	11,3
Effets respiratoires (particules inorganiques)	kg PM2,5 éq.	6,1E-03
Eutrophisation aquatique	kg PO_4 éq.	4,8E-04
Occupation des sols	m².an	0,6
Production d'ozone photochimique	kg éthylène éq.	3,7E-02
Épuisement des ressources minérales	kg épuisées	3,8
Dommage à la santé humaine	DALY	5,7E-05
Dommage aux écosystèmes	PDF.m².an	4,1

En ce qui concerne l'indicateur d'effet de serre, la valeur de 11,3 kg CO_2eq/m².an indique un bâtiment performant relativement à l'impact d'une maison standard de 2007 qui est de 27 kg CO_2eq/m².an d'après Peuportier (2008). On peut toutefois considérer qu'il existe encore une marge de progression vers de meilleures pratiques de conception.

L'impact de la prise en compte des fuites dans le total est analysé par un graphe radar comparant la prise en compte ou non de cet aspect dans le cycle de vie (Figure 2.24). La prise en compte des fuites n'induit pas de changement sur la plupart des indicateurs *midpoint* mais seulement sur l'effet de serre et l'ozone stratosphérique qui se répercute très faiblement au niveau *endpoint*. Étonnamment, et dans les hypothèses considérées (taux de fuites normaux et recyclage), c'est la fabrication du fluide qui influence le plus les résultats avec une augmentation de 8 % de la destruction de l'ozone stratosphérique contre une augmentation de seulement 3 % de l'effet de serre due essentiellement aux fuites de fluide elles-mêmes.

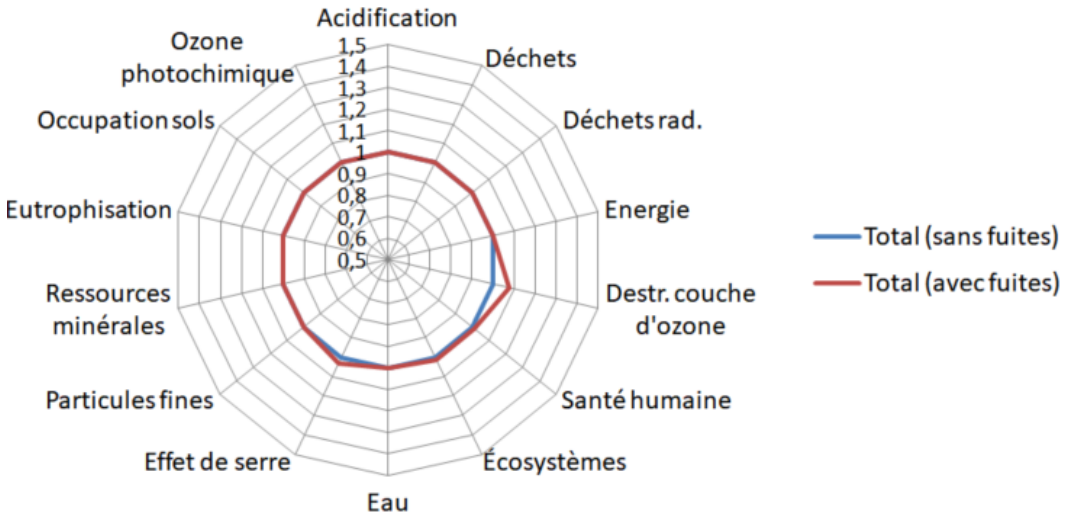


Figure 2.24 – Graphe radar des impacts totaux avec et sans prise en compte des fuites de fluide frigorigène

Une analyse de contribution par étape du cycle de vie permet d'identifier l'influence de chaque étape sur les différents indicateurs environnementaux. L'histogramme de la Figure 2.25 montre que l'étape de construction (incluant la fabrication des matériaux et des produits) contribue significativement aux impacts de plusieurs indicateurs avec entre 70 % et 80 % de l'acidification, de l'effet de serre, de l'émission de particules fines, de l'eutrophisation, de l'occupation des sols, de la production d'ozone photochimique, des ressources minérales. Au niveau *endpoint* la construction contribue à 62 % des dommages à la santé humaine et 75 % aux écosystèmes. Sur d'autres indicateurs l'étape d'utilisation

est prépondérante à cause de la consommation d'énergie : autour de 80 % des déchets radioactifs produits en raison du mix électrique français comportant beaucoup de nucléaire, 54 % de la consommation totale d'énergie primaire et autour de 60 % de l'utilisation d'eau qui provient à la fois de la consommation domestique mais aussi de l'eau de refroidissement des centrales nucléaires. Enfin, l'étape de déconstruction est particulièrement contributrice sur l'indicateur de déchets où elle représente 67 % des déchets produits dans le cycle de vie du bâtiment (déchets ménagers exclus). Cela est dû aux différents matériaux inertes mis en décharge qui composent le bâtiment : plâtre, briques, enduits minéraux, laine de roche. L'étape de déconstruction présente des bénéfices environnementaux sur les indicateurs de déchets radioactifs, d'énergie primaire, de couche d'ozone et d'eau qui sont également ceux où l'étape d'utilisation est la plus contributrice, les bénéfices proviennent de la valorisation en fin de vie qui évite des consommations d'énergie. Les bénéfices sur les indicateurs d'épuisement des ressources et d'acidification proviennent plutôt du recyclage.

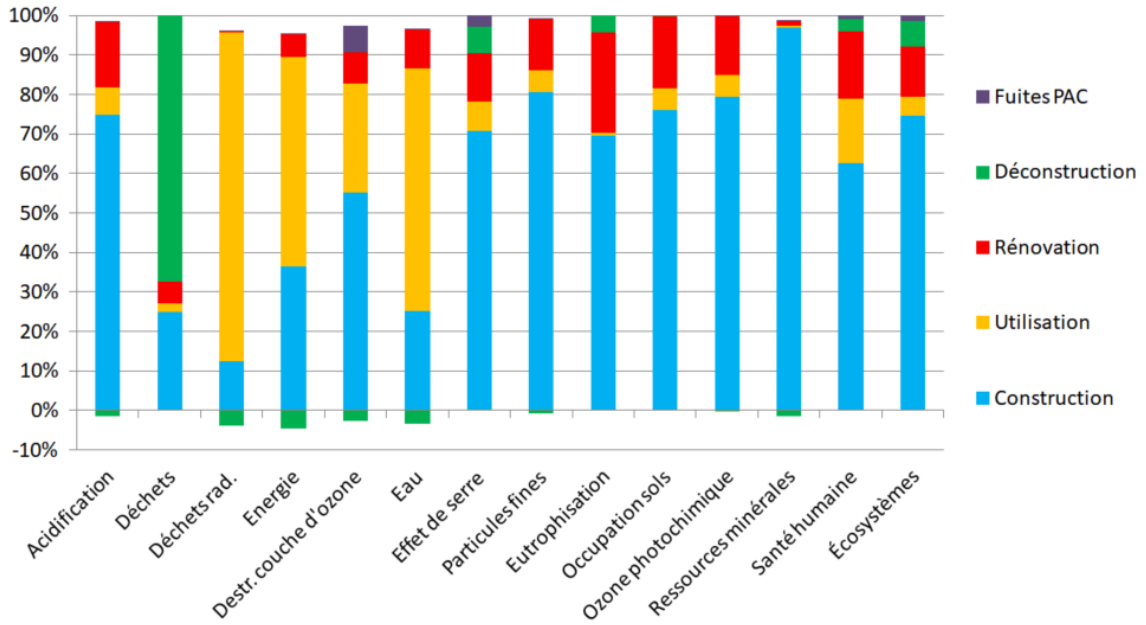


Figure 2.25 - Histogrammes des impacts par étapes du cycle de vie

Le réchauffement climatique étant une problématique majeure, des analyses de contributions plus détaillées à l'indicateur d'effet de serre sont effectuées dans les étapes de construction et d'utilisation.

La Figure 2.26 montre la contribution des différents lots à l'impact en effet de serre de l'étape de construction. Les lots les plus contributeurs sont les façades, les planchers intermédiaires, les cloisons et les fondations avec respectivement 26 %, 19 %, 14 % et 10 % de l'effet de serre de la construction. Cela s'explique en premier lieu par les parois lourdes de l'enveloppe composée de 25 cm d'isolant en polystyrène expansé et extrudé et de grandes quantités de béton. Les équipements CVC, techniques (plomberie, électricité), solaires thermiques et PV, représentent ensemble 10 % de l'effet de serre, dont 4 % pour le système solaire PV qui est l'équipement le plus impactant. Le transport des matériaux représente 9 % de l'effet de serre de la construction ce qui est relativement peu par rapport à l'ensemble des matériaux et systèmes. Enfin, les menuiseries représentent le lot le moins contributeur : les fenêtres ne représentent que 2 % de l'effet de serre de la construction et les portes fabriquées avec du bois certifié permettent de stocker du carbone.

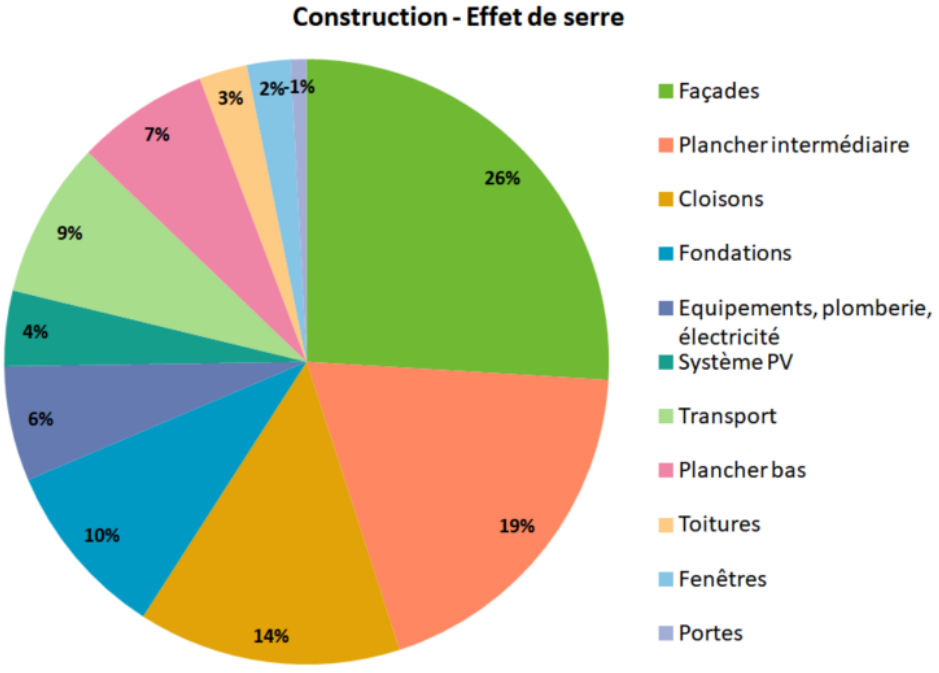


Figure 2.26 – Contributions à l'effet de serre de l'étape de construction

Concernant l'étape d'utilisation, la Figure 2.27 montre les contributions des postes de consommation d'électricité à l'émission de GES. Le classement des postes par contribution à l'émission GES est légèrement différent que le classement par quantité d'électricité consommée chaque année. Ainsi le poste le plus contributeur reste celui des appareils et de l'éclairage avec 57 % des émissions brutes, suivi de l'ECS avec 19 %. Le chauffage représente 12 % des émissions malgré sa part de 9 % dans la consommation totale d'électricité. À l'inverse, la production photovoltaïque qui couvre 69 % de la consommation électrique annuelle ne fait baisser les émissions de GES que de 56 %.

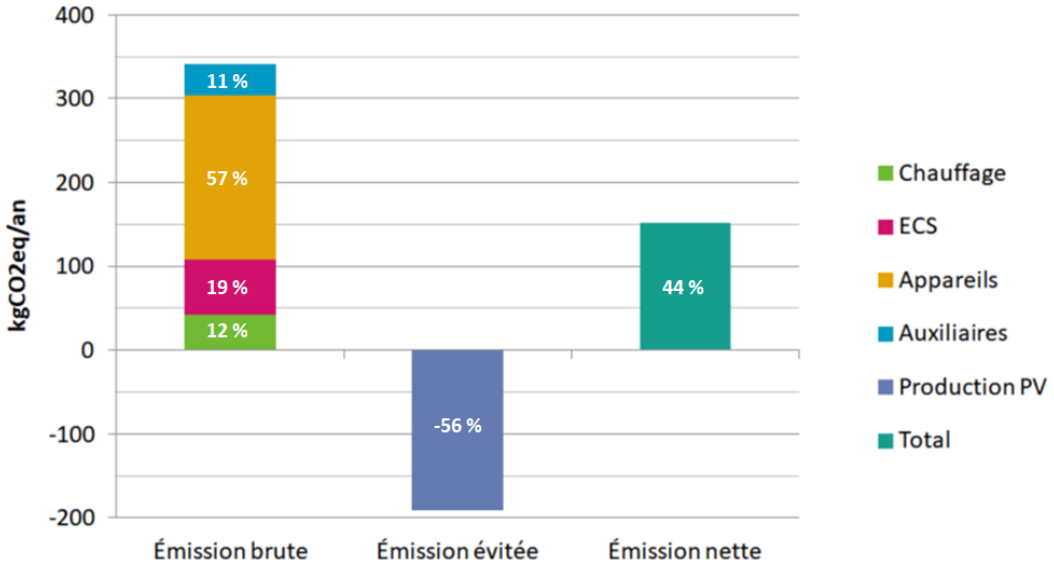


Figure 2.27 – Contribution des postes aux émissions de GES de l'étape d'utilisation

Ces différences reflètent le caractère saisonnier des impacts de certains usages de l'électricité. Ce phénomène est illustré en Figure 2.28 où sont indiquées les émissions de GES annuelles des usages de l'électricité du cas d'étude et l'émission de GES mensuelle d'un kWh d'électricité du réseau pour le mix électrique de 2020 généré avec le modèle de système électrique présenté en section 2.1.3 (approche attributionnelle) et les données de capacités provenant de RTE indiquées en Annexe D. La consommation d'une climatisation fictive installée dans le bâtiment a été ajoutée pour enrichir la comparaison. La figure montre l'adéquation entre les besoins thermiques et la production d'électricité plus ou moins émettrice selon la saison (C. Roux, Schalbart, et Peuportier, 2016). Les usages des

appareils ne présentent pas de caractère saisonnier et ont une émission moyenne de 50 gCO_2eq/kWh proche de la moyenne annuelle du mix électrique de 49 gCO_2eq/kWh.

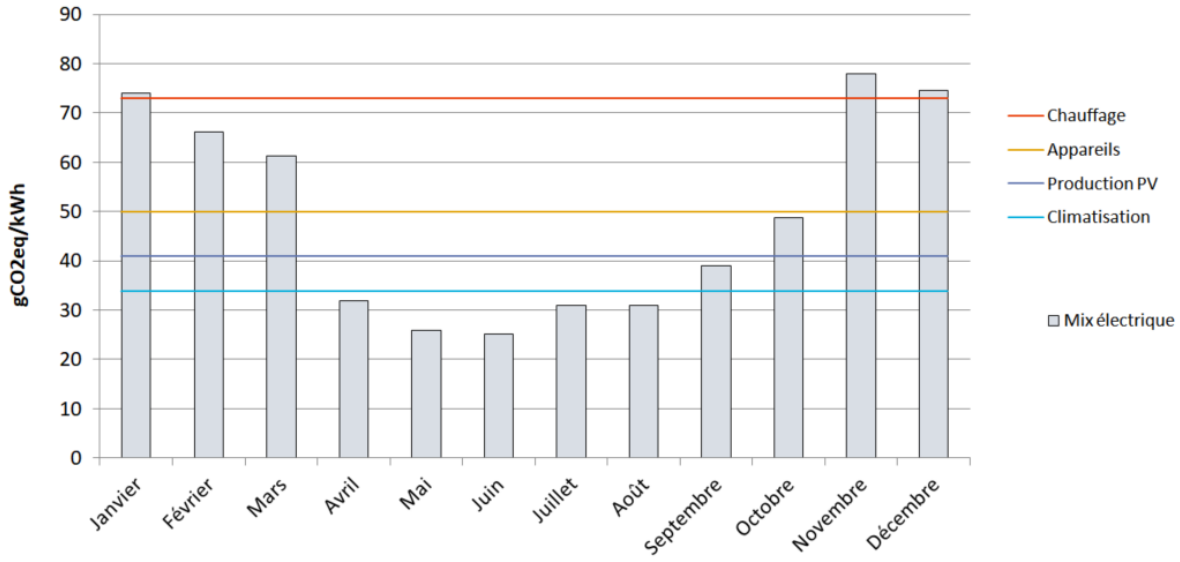


Figure 2.28 – Émission de GES annuelle d'un kWh de différents usages de l'électricité et émission mensuelle d'un kWh provenant du mix électrique (ACV attributionnelle)

Conclusion du chapitre 2

Ce chapitre a été l'occasion de présenter les outils de SED, d'ACV et d'optimisation multicritère qui serviront de base aux développements de ces travaux de thèse. Plusieurs améliorations ont été apportées à l'outil d'ACV afin de réduire les sources d'incertitudes liées à la représentativité des données et à la caractérisation des impacts. Concernant l'algorithme d'optimisation, une méthode d'échantillonnage quasi-aléatoire a été implémentée dans l'objectif d'améliorer la fiabilité de l'outil dans la recherche d'un front de Pareto global.

Le cas d'étude a été présenté. Il s'agit d'une maison passive familiale d'origine bulgare mais relocalisée en France pour ces travaux. Les études en SED et en ACV ont montré sa haute performance énergétique déjà proche d'un niveau zéro-énergie grâce au standard passif. Cette performance est atteinte par une enveloppe très lourde qui a pour conséquence une prépondérance de l'étape de construction dans les impacts environnementaux selon

plusieurs indicateurs, qui doit toutefois être relativisée par les bénéfices apportés par l'export d'électricité photovoltaïque durant l'étape d'utilisation. Bien que l'impact de son cycle de vie sur l'effet de serre le classe parmi les bâtiments performants d'un point de vue environnemental, il existe encore des marges de progression. La définition de l'espace de décision utilisé en optimisation multicritère sera importante pour permettre une réduction suffisante des impacts de l'enveloppe. Dans le même temps, un équilibre optimal devra être trouvé entre les impacts de la construction et ceux de l'utilisation, en particulier concernant les besoins de chauffage et le dimensionnement du système solaire PV.

3 OPTIMISATION MULTICRITÈRE DE BÂTIMENT ZÉRO-ÉNERGIE

Dans ce chapitre plusieurs problèmes d'optimisation multicritère sont définis dans le but d'identifier des conceptions de bâtiment zéro-énergie optimales à partir du cas d'étude présenté dans le chapitre précédent. Ces différents problèmes explorent des hypothèses sur l'espace de décision, la méthode d'échantillonnage de la population initiale et le type de contrainte zéro-énergie. Ils permettent de tester la robustesse et les limites de la procédure d'optimisation multicritère face à ces incertitudes liées à des choix.

3.1 Problème d'optimisation multicritère initial

3.1.1 Présentation du problème

Dans cette partie nous définissons le problème d'optimisation selon les six points suivants :

- objectifs généraux ;
- fonction d'évaluation ;
- grandeurs d'intérêt ;
- fonctions objectif ;
- contraintes ;
- espace de décision.

L'objectif général est d'optimiser le cas d'étude présenté ci-avant : une maison familiale passive, d'une durée de vie de 80 ans, exportant une production PV sur le réseau et répondant aux critères de confort du standard passif. Cette optimisation se déroule dans un contexte d'aide à la décision pour l'écoconception d'un projet de construction et vise à identifier des solutions de type « zéro-énergie » ou BEPOS à moindre coûts de construction. Cet objectif correspond au développement, en lien avec le projet européen AZEB, d'une méthodologie permettant de réduire le coût associé à la construction de bâtiments zéro-énergie en vue du développement massif de ce type de bâtiments suite à la nouvelle réglementation européenne.

La fonction d'évaluation est composée des modélisations en SED et en ACV du cas d'étude et permet de calculer les grandeurs d'intérêt d'une solution de conception. La fonction d'évaluation et ses résultats dépendent de la description du système d'étude et des hypothèses de modélisation. La fonction d'évaluation du cas d'étude repose sur la démarche d'ACV décrite dans le chapitre 2.

Les grandeurs d'intérêt sont les mesures quantitatives associées à chaque solution de conception rencontrée durant l'optimisation et qui participent à l'évaluation des fonctions objectif, du respect des contraintes ou à l'étude de manière générale, par exemple dans

l'analyse des résultats *a posteriori*. Les grandeurs d'intérêt qui peuvent répondre aux objectifs de notre étude sont décrites dans la suite.

- Le bilan d'énergie annuel : les différents types de bilan zéro-énergie ont été décrits dans l'état de l'art du Chapitre 1. Dans ce premier problème d'optimisation, le bilan d'énergie retenu est la **consommation nette d'énergie finale**, qui ne concerne que de l'électricité dans ce cas d'étude, et qui est égale à la consommation brute d'énergie moins la part d'autoconsommation et d'export sur le réseau.
- Les impacts environnementaux : les grandeurs d'intérêt environnementales sont aussi diverses qu'il existe d'indicateurs d'impact. Ces indicateurs sont calculés sur le cycle de vie complet afin d'éviter le déplacement d'impact dans le temps. Ils peuvent varier selon la méthode de calcul employée : méthodes de caractérisation, horizon temporel, approche marginale, etc. La fonction d'évaluation adoptée dans ces travaux de thèse permet de calculer 14 indicateurs environnementaux dans une approche attributionnelle. Toutefois le nombre de fonctions objectif est limité techniquement par les capacités de convergence de l'algorithme et limité en pratique pour faciliter la prise de décision. L'émission de GES anthropogénique, qui est la cause principale du **changement climatique,** est une problématique majeure dont l'aggravation à de multiples conséquences physiques (hausse de température, détérioration des sols, etc.) qui contribuent fortement aux dommages à la santé humaine (fortes chaleurs, conflits géopolitiques, …) et la qualité des écosystèmes (Bulle et al., 2019). Dans ces premiers problèmes d'optimisation, il est considéré comme un objectif à minimiser en priorité. Les autres indicateurs environnementaux seront des grandeurs d'intérêt d'observation qui pourront être employées *a posteriori.*
- La performance économique : La performance économique d'un bâtiment peut être évaluée à travers un coût de cycle de vie (« *life cycle cost », LCC*) qui tient compte des coûts de la construction, de l'utilisation, des rénovations et de la fin de vie du bâtiment. Cette approche est toutefois peu fiable dans une évaluation de long terme où le coût d'une longue étape d'utilisation est particulièrement dépendant des évolutions du prix de l'énergie. Dans ce contexte, le coût de cycle de vie devrait être calculé en considérant des incertitudes prospectives sur certaines variables économiques (Rysanek et Choudhary, 2013). De plus, le principal frein au développement actuel des bâtiments

performants et zéro-énergie est le coût de construction plus élevé qu'ils représentent par rapport à des bâtiments standards. L'objectif de cette thèse s'inscrivant dans cette problématique et celle du projet A-ZEB de rendre les bâtiments zéro-énergie abordables, **le coût de construction** sera la grandeur d'intérêt économique considérée en optimisation.

- Le confort thermique : le confort représente une grandeur d'intérêt sociale. Le confort est une notion subjective dont la définition varie grandement d'une personne à une autre. Seule la notion de confort thermique est adoptée dans cette thèse. Elle est évaluée à partir de seuils de température au-delà desquels on définit une situation d'inconfort thermique. L'inconfort est rencontré pour des températures intérieures qui sont inférieures à 16°C ou supérieures à 26°C. Le **nombre d'heures d'inconfort** dans l'année est l'indicateur d'inconfort thermique retenu dans cette thèse. Il servira de grandeur d'intérêt d'observation dans l'analyse des solutions *a posteriori*.

Deux fonctions objectif $f_1(x)$ et $f_2(x)$sont définies en accord avec les objectifs et les grandeurs d'intérêt décrits ci-avant :

$$\begin{cases} \min f_1(\boldsymbol{x}) = GES_{tot}\,(\boldsymbol{x}) \\ \min f_2(\boldsymbol{x}) = C_{const}\,(\boldsymbol{x}) \end{cases} \tag{3.1}$$

avec :

x une solution de conception de bâtiment caractérisée par les valeurs de ses variables de décision ;

$GES_{tot}(x)$ l'émission de GES totale du cycle de vie d'une conception de bâtiment x, exprimée en kgCO_2eq/an et calculée avec le modèle et les hypothèses d'ACV présentées dans le chapitre 2 ;

$C_{const}(x)$ le coût de construction d'une conception de bâtiment x, exprimé en € investis et calculé à partir des données de coûts des paramètres de l'espace de décision.

Une contrainte est définie dans le but de n'identifier que des solutions de conception zéro-énergie ou BEPOS, qui se définissent par un bilan net exportateur sur le réseau :

sous contrainte de $$E_{\text{elec}}(\boldsymbol{x}) > 0 \tag{3.2}$$

avec $E_{elec}(x)$ le bilan d'électricité annuel net exporté sur le réseau d'une conception de bâtiment x, exprimé en kWh/an.

L'espace de décision du problème d'optimisation est constitué de paramètres de conception qui concernent :

- l'épaisseur d'isolant par parois et plancher ;
- le type de fenêtre entre double et triple vitrage par orientation ;
- la surface de fenêtre par orientation ;
- la surface de panneaux solaire PV en toiture.

Le détail de cet espace de décision est donné dans le Tableau 3.1. La combinatoire totale représente 2×10^{14} solutions qui, à raison de 4 secondes de calcul par solution, correspond à un temps de calcul de près de 22 millions d'années (Tableau 3.2). Il est ainsi impossible d'identifier l'optimum global réel de ce problème d'optimisation, ni d'évaluer la performance de l'algorithme d'optimisation par comparaison à cet optimum global.

Les variations de type de vitrage et de surface de fenêtres sont appliquées aux fenêtres groupées par orientation afin de simplifier le problème et conserver une cohérence architecturale. Les caractéristiques des deux types de vitrage sont indiquées dans le Tableau 3.3. Seuls des vitrages performants sont considérés : les doubles vitrages sont à basse émissivité et à lame d'argon. La borne supérieure de variation de la surface de panneaux PV correspond à la surface maximale disponible en toiture de 66,5 m². Elle permet de doubler la surface actuelle de 33,3 m² et facilitera la recherche de solutions BEPOS.

Tableau 3.1 – Espace de décision du problème d'optimisation initial

Paramètre	Élément	Nombre d'éléments	Niveaux (niveau initial)	Unité	Nombre niveaux
Épaisseur isolant (EPS)	Mur extérieur Mur intérieur RDC Plancher combles Toiture-terrasse RDC	4	6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 30, 35	cm	12
	Mur extérieur garage	1	0, 6, 7, 8, 9, 10	cm	6
	Mur extérieur combles	1	0, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 20, 25	cm	11
Épaisseur isolant (XPS)	Plancher bas sur terre-plein Plancher intermédiaire sur vide-sanitaire	2	6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 30, 35	cm	12
Type de vitrage	Nord Sud Est Ouest	4	double vitrage, triple vitrage	-	2
Surface de vitrage	Nord Sud Est Ouest	4	-30%, -20%, -10%, +0%, +10%, +20%, +30%	surface unitaire	7
Surface de panneaux PV	Panneaux PV sur toiture	1	[29,9 :1,6 :66,5] (33,3)	m²	23

Tableau 3.2 - Aperçu de l'espace de décision du problème d'optimisation multicritère

Paramètres	Unité	Nombre d'éléments	Nombre combinaisons
Épaisseurs d'isolant	cm	8	2e8
Types de vitrage	-	4	16
Surfaces de fenêtre	m²	4	2401
Surface de panneau PV	m²	1	23
Total			2e14

Tableau 3.3 - Caractéristiques du double et du triple vitrage considérés dans l'espace de recherche

Paramètres	Uw (W/m².K)	Sw	Tl	Cadre
Double vitrage	1,3	0,46	0,82	PVC
Triple vitrage	0,85	0,42	0,74	PVC

3.1.2 Données économiques

Des données économiques utilisées pour caractériser les différents paramètres de l'espace de décision ont été collectées auprès de diverses sources. Tout d'abord, l'entreprise partenaire du projet A-ZEB a fourni des données de coûts réels de la construction du cas d'étude. Ces coûts ont permis d'identifier certains ordres de grandeurs et des différences par exemple entre matériau ou type de vitrage. Cependant leur dépendance au contexte bulgare limite leur application à un cas français. Les données ont été complétées par des données de coût partagées par le projet REHA-PARCS[18], qui

[18] https://anr.fr/Projet-ANR-15-CE22-0011

s'intéresse à la réhabilitation du parc bâti, ainsi que des données du site « databfr[19] » et de projets de recherche passés. Un travail de recoupement entre les différentes sources a été réalisé pour identifier les coûts qui pouvaient être les plus représentatifs.

L'objectif de la démarche est d'obtenir un jeu de données de coûts suffisant pour quantifier des différences d'investissement entre les variantes de conception. Certains coûts qui sont considérés identiques quelle que soit la conception ne sont pas pris en compte. Le détail des coûts de ce problème d'optimisation est donné dans la suite.

Les coûts de fourniture en € HT/m² des isolants en polystyrène expansé (EPS) et en polystyrène extrudé (XPS) ont été définis grâce à une régression linéaire des données en fonction de leur épaisseur (Figure 3.1). Des coûts sont également considérés pour la main d'œuvre associée à la mise en place de l'isolant, et à la fourniture et à la main d'œuvre de l'enduit extérieur. Ces coûts sont considérés comme indépendants de l'épaisseur d'isolant et ne vont pas varier entre les variantes de conception mais ils serviront à comparer des variantes constructives dans un autre problème d'optimisation. Ils sont renseignés dans le

Tableau 3.4. Concernant les fenêtres, seuls les coûts de fourniture sont considérés en faisant l'hypothèse que le coût de main d'œuvre reste inchangé quel que soit le type de vitrage et quelle que soit la surface vitrée dans l'intervalle de variation autorisé par l'espace de décision. La fenêtre à triple vitrage en PVC coûte 40 €/m² de plus que la fenêtre à double vitrage en PVC (Tableau 3.4). Le coût de l'installation du système solaire PV ne prend en compte que l'investissement dans les panneaux qui est dégressif en augmentant la surface totale (Figure 3.2). Les coûts du raccordement et de l'onduleur sont considérés comme fixes quelle que soit la variante et ne sont pas inclus dans l'étude.

[19] http://databfr/ : regroupe des données de coûts pour de nombreux travaux du bâtiment (du gros œuvre aux menuiseries et l'installation de systèmes).

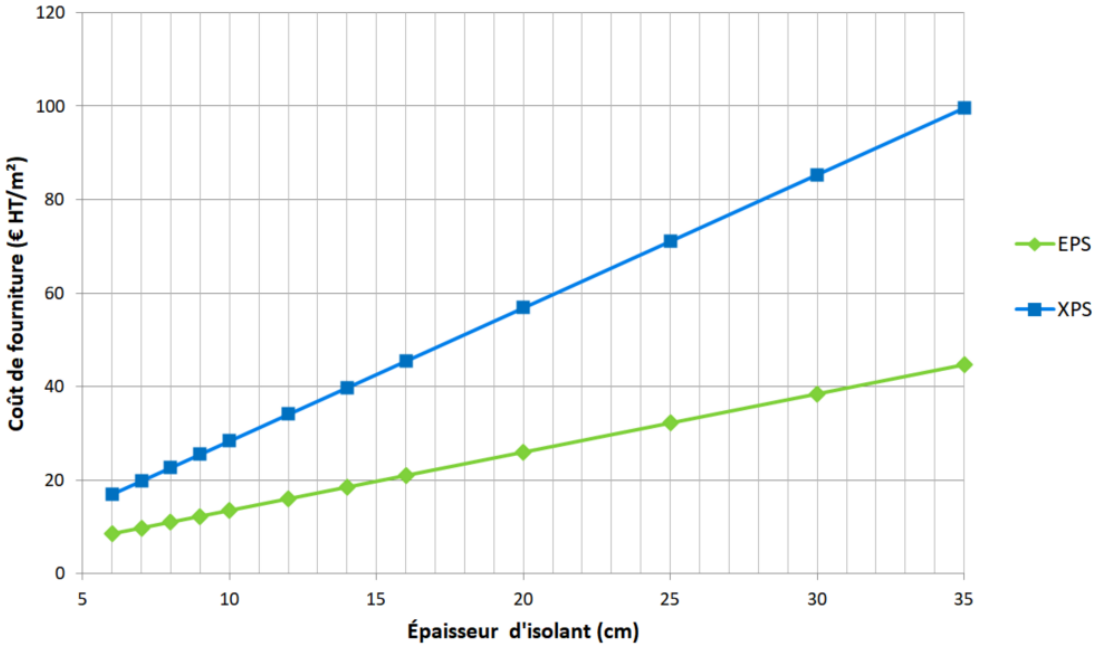


Figure 3.1 – Coût en € HT/m² des isolants en polystyrène en fonction de l'épaisseur

Tableau 3.4 – Données de coûts du cas de base en béton et polystyrène

Type de vitrage	Coût (€/m²)
Main d'œuvre isolant	17,5
Main d'œuvre enduit extérieur	17,5
Fourniture enduit extérieur	15
Fourniture double vitrage PVC	230
Fourniture triple vitrage PVC	270

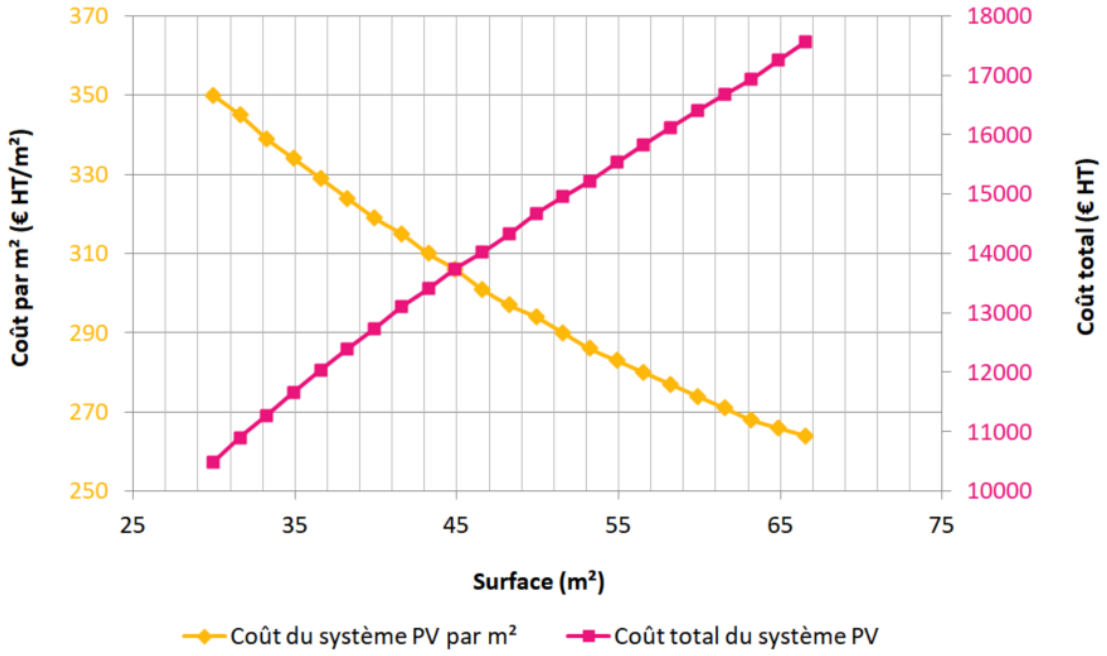


Figure 3.2 – Coûts d'un système PV d'une puissance de 150Wc/m²

3.1.3 Analyse des résultats

La configuration du problème et de l'algorithme d'optimisation est donnée dans le Tableau 3.5. Pour ce premier problème la population initiale est échantillonnée aléatoirement. L'optimisation dure 9h40 avec une parallélisation des calculs sur 7 *threads* simultanés. L'expression « problème d'optimisation multicritère » est abrégé « POM » dans la suite.

La Figure 3.3 montre l'évolution au fil des générations du front des solutions non dominées et la conception initiale en rouge. Afin de pouvoir analyser les améliorations apportées par l'optimisation, la différence de coût par rapport à la conception initiale est considérée en abscisse. Dès les premières générations de l'optimisation (les plus claires sur le graphique), des solutions plus performantes que la solution de conception en termes d'émission de GES et de coût de construction sont identifiées avec une réduction moyenne de 1,5 $kgCO_2eq/m^2.an$ et de 50 €/m² simultanément.

Tableau 3.5 – Caractéristiques du problème d'optimisation initial

Nom du problème	POM simple		
Nb. individus	200	Taux de croisement	0,9
Nb. générations	40	Taux de mutation	0,15
Échantillonnage	Aléatoire	Espace de décision	Simple
Fonctions objectif	$\begin{cases}\min f_1(x) = GES_{tot}\,(x) \\ \min f_2(x) = C_{const}\,(x)\end{cases}$	Contrainte	$E_{\text{elec}}(x) > 0$

Figure 3.3 – Évolution du front de Pareto du POM simple

L'observation de l'évolution du front toutes les 5 générations (Figure 3.4), montre que l'algorithme atteint un niveau satisfaisant de convergence dès la 20ème génération. Les solutions des fronts des générations suivantes ne présentent pas d'amélioration significative de performance sur les fonctions objectif. Sur ce POM simple le nombre de générations et le temps de calcul pourraient être réduits d'un facteur 2 pour atteindre une même qualité globale du front. Le dernier front de Pareto est composé de 34 solutions optimales toutes de niveau zéro-énergie ou BEPOS avec un bilan d'énergie finale net exportateur qui varie de 0 à 10,4 kWh/m².an (Figure 3.5).

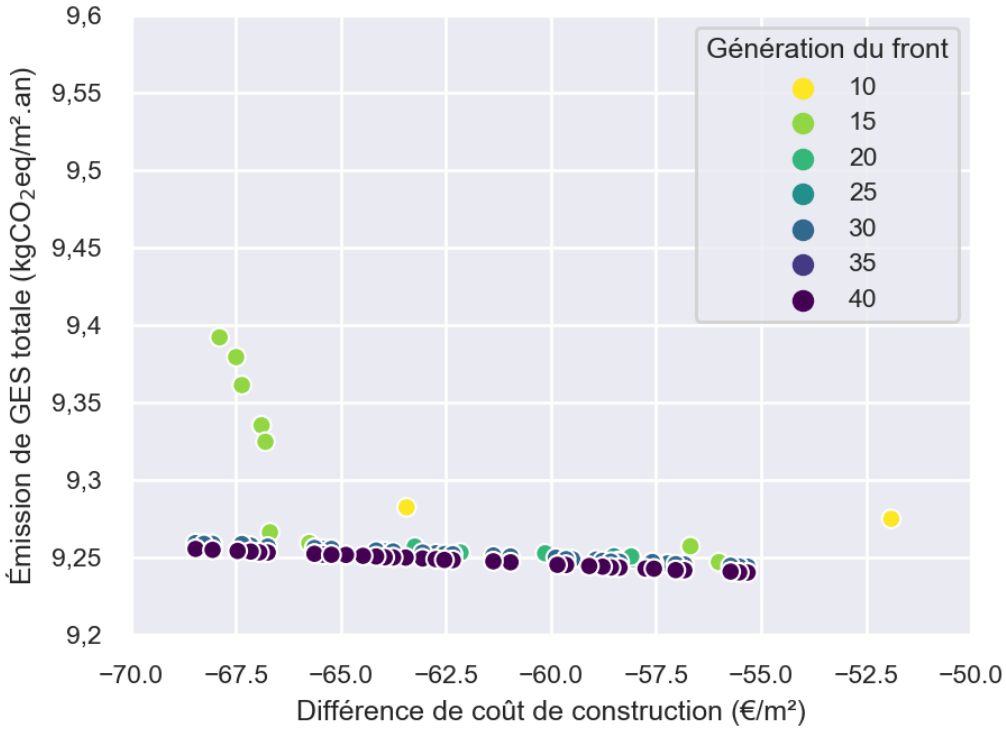


Figure 3.4 – Évolution du front du POM simple avec un pas de 5 générations

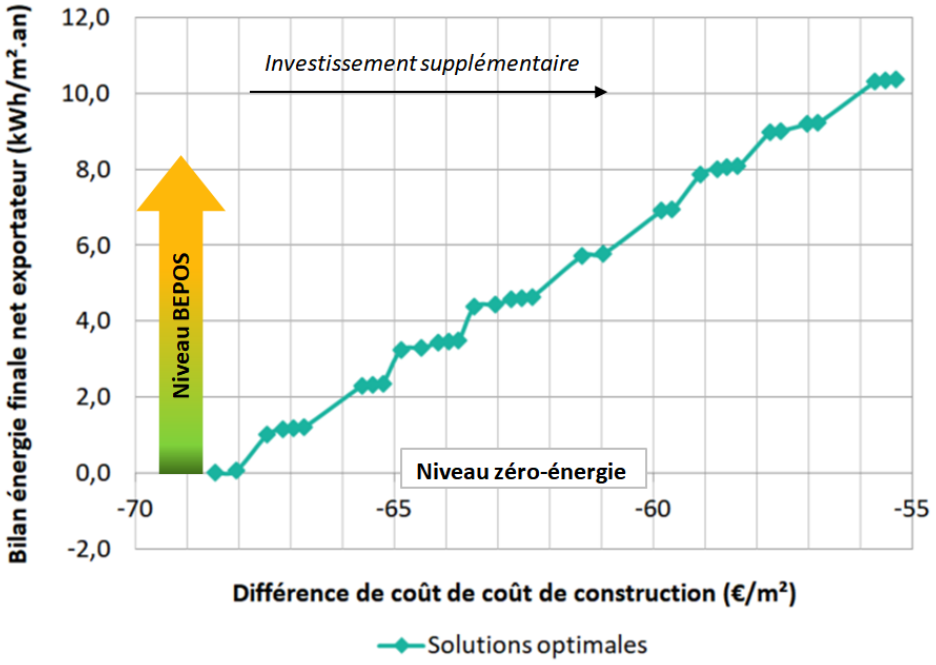


Figure 3.5 – Évolution du bilan d'énergie des solutions optimales du POM simple en fonction du coût de construction

L'analyse des paramètres de conception et des performances énergétiques des solutions optimales donne des indications quant à la stratégie d'optimisation proposée par l'algorithme. Une première analyse concerne l'étape d'utilisation avec la distribution de l'investissement supplémentaire entre la réduction des besoins de chauffage ou l'installation de panneaux solaires PV pour la production d'électricité. La Figure 3.6 montre une tendance globale à flécher l'investissement supplémentaire vers plus de production PV. Elle varie de 35 à 46 kWh/m².an parmi les solutions optimales, soit plus que les 23 kWh/m².an de la conception initiale. Les besoins de chauffage sont maintenus autour de 28 kWh/m².an qui est une valeur plus élevée que les 10,4 kWh/m².an de la conception initiale. Le critère du standard passif (< 15 kWh/m².an) n'est plus respecté, mais ces besoins restent toutefois raisonnables (environ le niveau basse consommation) sachant qu'ils sont assurés par une PAC avec un COP de 3,52. L'observation locale du graphique montre que, pour une surface PV constante, l'investissement supplémentaire se tourne vers la réduction des besoins de chauffage, jusqu'à atteindre un seuil où une partie

de cet investissement revient vers une augmentation de surface solaire PV au détriment des besoins de chauffage.

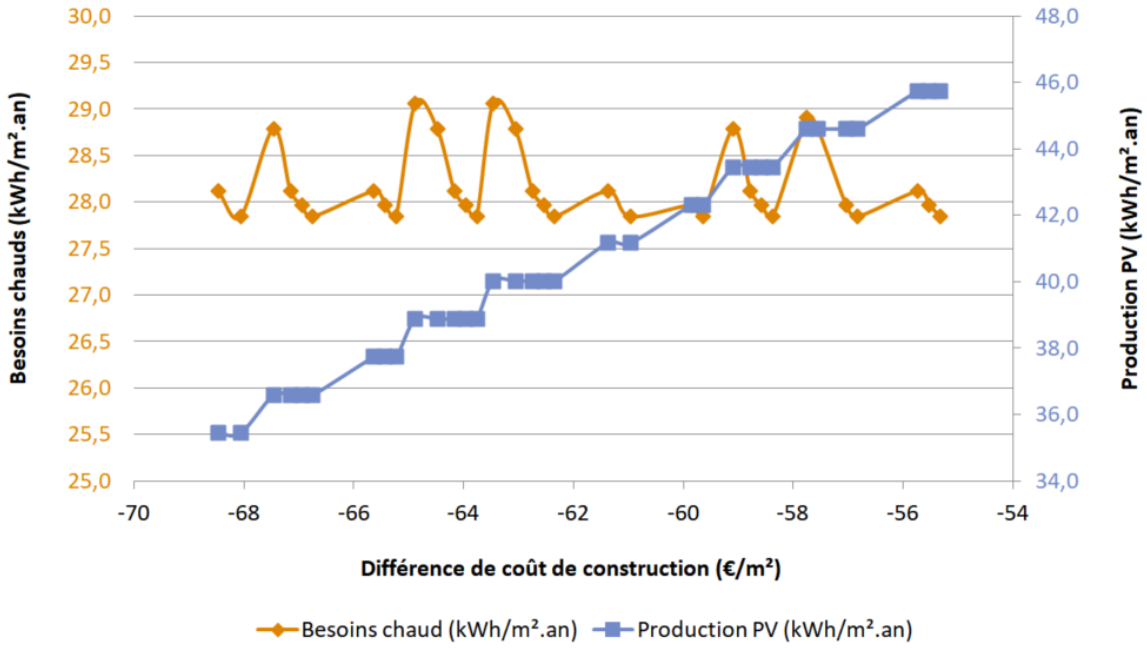


Figure 3.6 – Évolution des besoins de chauffage et de la production PV avec l'investissement dans les solutions du front du POM Simple

Les solutions optimales sont très homogènes et partagent les mêmes caractéristiques sur de nombreux paramètres d'enveloppe. Toutes les solutions sont en double vitrage, avec des épaisseurs d'isolant identiques dans les murs extérieurs, les murs du RDC sur VS, les planchers sur TP et sur VS qui correspondent au minimum autorisé de 6 cm. L'isolation de la toiture terrasse varie entre 8 et 10 cm et celle du plancher des combles varient entre 6 et 7 cm. Les murs extérieurs du garage et des combles, qui sont des locaux non chauffés, ont une isolation nulle. Enfin, les ratios de surfaces vitrées atteignent tous le minimum autorisé, c'est-à-dire une réduction de 30 % des surfaces initiales, soit des surfaces vitrées de 30 % au Sud, 10,5 % au Nord, 14,5 % à l'Est et 1,3 % à L'Ouest. Concernant la surface de panneaux solaires PV, celle-ci varie entre 51,6 et 66,5 m² ce qui est supérieur à la surface initiale de 33 m².

L'analyse des émissions de GES à l'échelle du cycle de vie permet d'apporter une perspective à cette stratégie de conception. La Figure 3.7 montre les émissions moyennes de GES des solutions optimales pour chaque étape du cycle de vie, et les émissions de GES de la conception initiale. La plus forte réduction des impacts se situe sur l'étape de construction (-1,3 $kgCO_2/m^2.an$) puis les étapes de déconstruction et d'utilisation (-0,6 et -0,5 $kgCO_2/m^2.an$ respectivement). En revanche, l'émission de GES moyenne de l'étape de rénovation augmente légèrement par rapport à la conception initiale (+0,3 $kgCO_2/m^2.an$). Là encore, les solutions optimales présentent une très forte homogénéité avec des barres d'erreurs basées sur l'écart-type qui ne sont pas significatives.

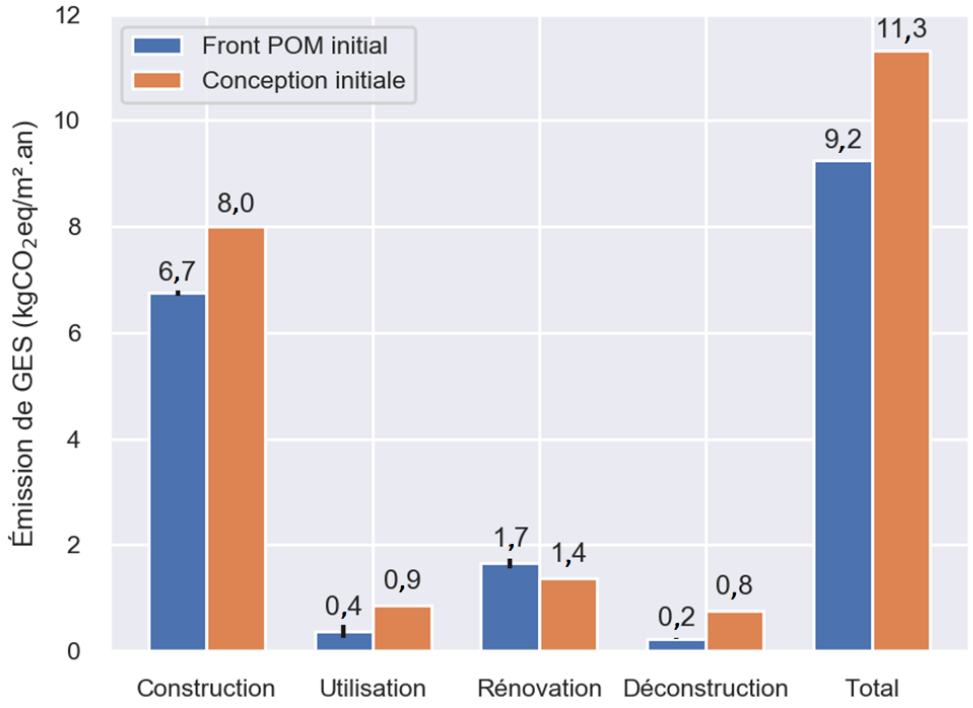


Figure 3.7 – Comparaison des émissions de GES moyennes des solutions optimales avec les émissions de la conception initiale

La stratégie de conception optimale est ainsi basée sur l'équilibre entre deux mécanismes principaux :

- L'allégement de l'enveloppe pour réduire à la fois les émissions de GES durant la construction et la déconstruction, et les coûts de construction. Ce mécanisme agit au détriment des besoins de chauffage.
- L'agrandissement de la surface de panneaux solaire PV pour répondre à la contrainte d'un bilan zéro-énergie/BEPOS et profiter du bénéfice environnemental qu'apporte leur surplus de production sur le réseau durant l'étape d'utilisation. Ce mécanisme agit au détriment de l'émission de GES dans l'étape de rénovation.

L'homogénéité des solutions optimales en termes de paramètres de conception, de leurs besoins de chauffage et d'émissions de GES, ainsi que le ralentissement précoce de l'évolution du front peuvent indiquer que l'algorithme a soit atteint l'optimum global de ce POM, soit est resté piégé dans un optimum local. Cette dernière éventualité est *a priori* à rejeter, étant donné le caractère relativement « fermé » du problème avec la présence d'une contrainte sur le bilan énergétique et d'un espace de décision relativement simple en termes de solutions architecturales proposées. Par ailleurs, dans une perspective de cycle de vie, le cas d'étude présente une très forte part d'émission de GES due à l'étape de construction et, au vu du problème tel qu'il a été posé, l'algorithme a identifié ce qui semble être la seule stratégie optimale possible : la réduction des impacts de l'enveloppe et l'investissement dans les bénéfices environnementaux apportés par les panneaux solaires PV, le tout dans un équilibre économique optimal. Afin « d'ouvrir » un peu plus ce problème d'optimisation et d'identifier d'autres stratégies d'optimisation, l'espace de décision va être élargi pour y inclure d'autres solutions architecturales.

3.2 Influence de l'espace de décision

3.2.1 Présentation du problème

Dans ce deuxième problème d'optimisation, les hypothèses du problème initial sont conservées et l'espace de décision est élargi afin d'inclure plusieurs systèmes constructifs et types d'isolants. Cet agrandissement de l'espace de décision est notamment possible

grâce aux données de coût du projet REHA-PARCS qui rassemblent de manière cohérente les coûts de différentes solutions d'isolation. Celles-ci sont complétées par les coûts des systèmes constructifs provenant du service datab.fr.

3.2.2 Espace de décision

Le nouvel espace de décision comprend quatre variantes d'isolation du système constructif en béton initial : du polystyrène expansé (le cas de base, EPS), de la laine de verre (LDV), de la laine de roche (LDR) et de la fibre de bois (FDB). Une variante construite en ossature bois et isolée en paille est considérée pour permettre une solution biosourcée. Dans chaque cas, le parement extérieur est adapté au type d'isolant. Une description générale de ces variantes est donnée dans le Tableau 3.6 avec leurs noms d'abréviation. Le descriptif détaillé des compositions des parois est donné en Annexe A.

Tableau 3.6 – Systèmes constructifs, isolants et parement considérés dans l'espace de décision élargit

Variante	Système constructif	Isolant	Parement	Abréviation
Base EPS	Béton	Polystyrène (EPS)	Enduit minéral	B-EPS
Laine de verre	Béton	Laine de verre	Bardage bois	B-LDV
Laine de roche	Béton	Laine de roche	Enduit minéral	B-LDR
Fibre de bois	Béton	Fibre de bois	Enduit minéral	B-FDB
Bois-paille	Ossature bois	Paille	Enduit chaux	OB-P

Les changements de système constructif se retrouvent dans le changement de composition de certaines parois par rapport au cas d'étude initial. Ces changements sont illustrés à la Figure 3.8. Sur cette figure chaque couleur représente une variante constructive qui définie par son isolant et/ou sa structure. Les bornes de variation des épaisseurs d'isolants sont données entre les crochets.

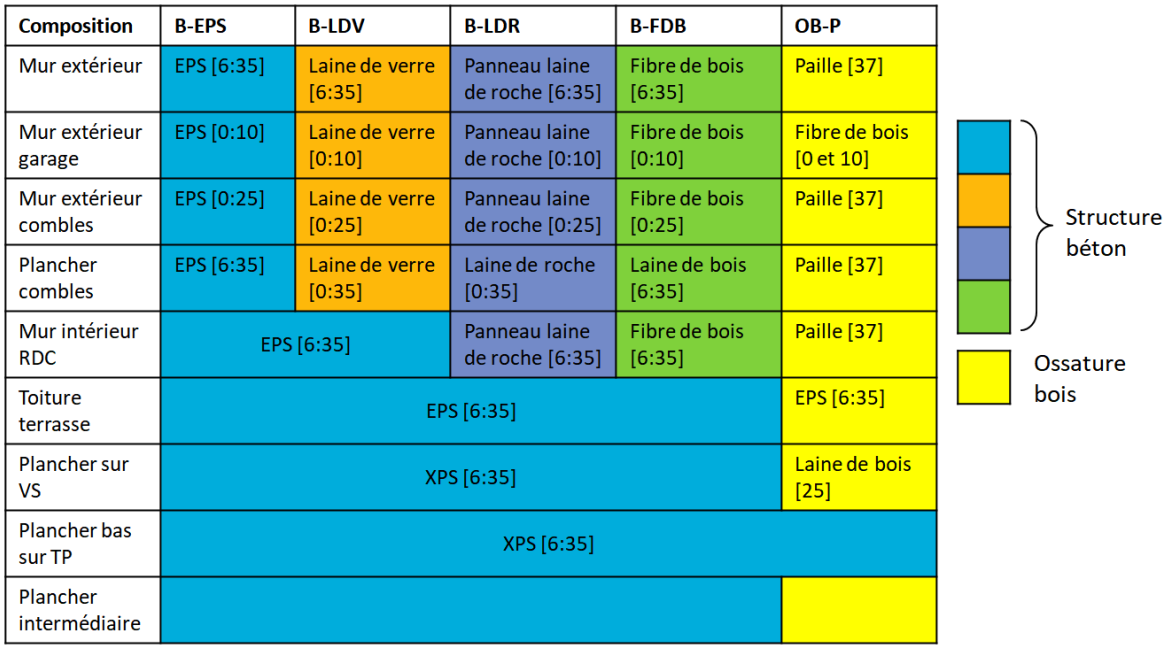


Figure 3.8 – Vue d'ensemble des variantes structurelles. Le type d'isolant et ses bornes inférieure et supérieure de variation sont indiqués dans les cases

En ce qui concerne les systèmes constructifs en béton, les changements de composition ont lieu dans les parois verticales isolées et dans l'isolation des combles : mur extérieur, mur extérieur du garage, mur extérieur des combles, mur intérieur du RDC sur vide-sanitaire (VS), plancher des combles. La variante « béton et laine de verre » (B-LDV) conserve toutefois la même composition du mur intérieur du RDC que dans le cas de base. Dans les variantes « béton et laine de roche » et « béton et fibre de bois », les isolants des parois extérieures sont des panneaux rigides à haute densité et les combles sont isolés avec de la laine de roche et de la laine de bois respectivement. En ce qui concerne la variante en ossature bois, l'ensemble de la structure est modifiée et implique des changements de composition également dans la toiture terrasse, le plancher sur VS et le plancher intermédiaire intérieur (non isolé). Le plancher bas sur terre-plein (TP) reste de même composition dans toutes les variantes. L'isolation de la variante OB-P est en botte de paille qui a la spécificité d'être de hauteur et de largeur fixes (37 x 47 cm). La botte de paille peut être installée dans deux configurations d'épaisseur d'isolation mais seule l'épaisseur d'isolation de 37 cm est retenue pour que les variantes s'éloignent peu des dimensions possibles du cas initial. La majorité des compositions de la variante OB-P sont fixes ; seule

l'isolation du mur extérieur du garage (limitée par l'épaisseur entre les montants en bois) et de la toiture terrasse peuvent varier générant 24 variantes possibles de ce système constructif. Ceci permettra de simplifier l'analyse des résultats et la comparaison des performances des systèmes constructifs.

Les données de coûts sont étendues aux coûts des structures, des isolants et des parements. Les coûts des ouvrages structurels (voile béton, plancher, ossature bois, etc.) proviennent principalement de datab.fr et sont indiqués dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 – Coût en € HT/m² de la fourniture et de la main d'œuvre d'ouvrages structurels

	Épaisseur (cm)	Coût (€ HT/m²)
Voile béton banché	20	116
	25	145
Mur en brique	21	73
Mur ossature bois	20	149
	25	157
Chape	< 5	27
Plancher béton	-	132
Plancher bois	-	177

Les fonctions de coût de fourniture des isolants sont indiquées à la Figure 3.9. Elles proviennent en grande partie des données de REHA-PARCS. Le polystyrène extrudé (XPS) utilisé pour isoler les planchers sur TP et sur VS est le plus cher. La laine de roche basse densité est moins chère que le panneau à haute densité. En revanche le coût de la laine de bois est le même que pour le panneau en fibre de bois par manque de données.

Les coûts associés aux parois verticales sont donnés dans le Tableau 3.8. Ils concernent la fourniture et la main d'œuvre du parement ainsi que la main d'œuvre pour leur isolation. Le coût de la structure ossature bois est plus élevé que celui de la structure en béton d'après les données recueillies.

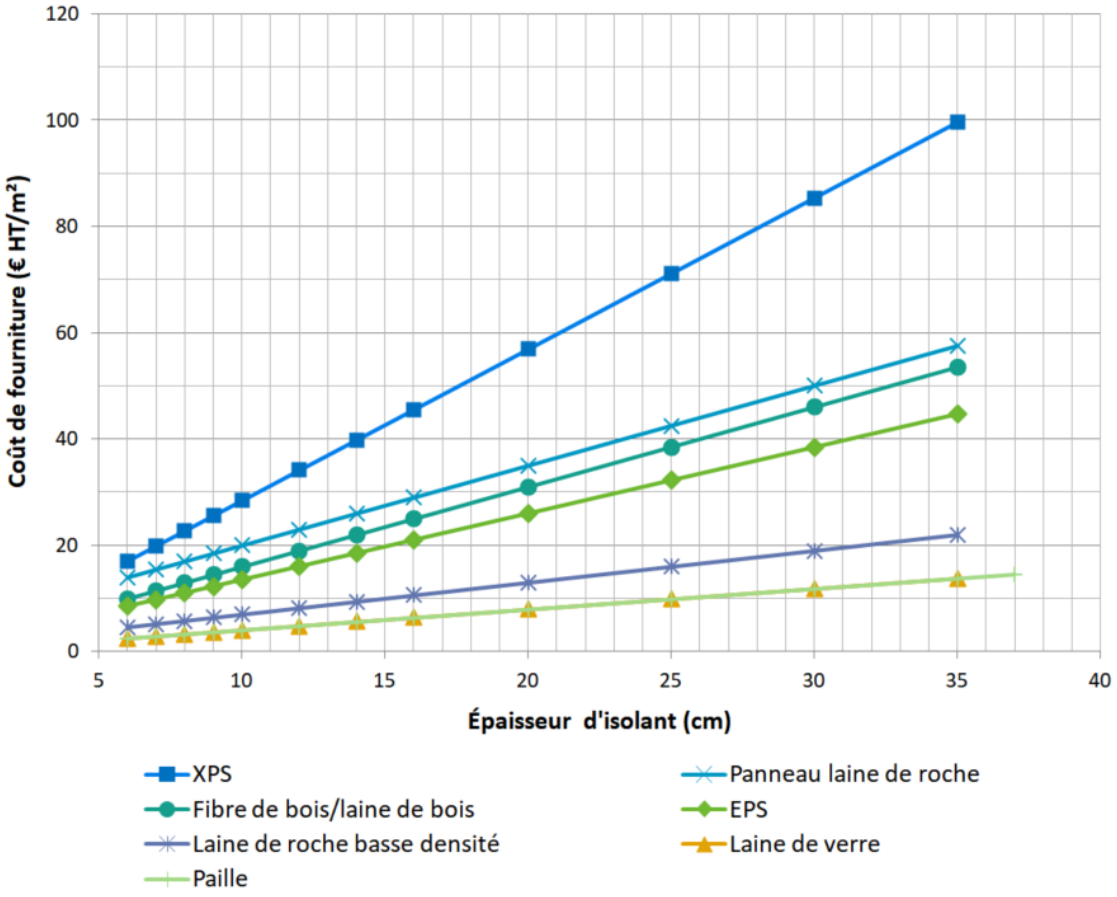


Figure 3.9 – Coûts de fourniture des isolants en € HT/m² en fonction de leur épaisseur

Tableau 3.8 – Coûts en € HT/m² de la fourniture de parement et de la main d'œuvre pour l'isolation et le parement de parois verticale

Isolant	Parement	Fourniture (€ HT/m²)	Main d'œuvre isolation et parement (€ HT/m²)
EPS, Laine de roche, Fibre de bois	Enduit minéral	15	35
Laine de verre	Bardage bois	40	55
Paille	Enduit chaux	40	45

Les coûts associés aux planchers et à la toiture terrasse sont donnés dans le Tableau 3.9. Ils concernent la main d'œuvre pour leur isolation et la fourniture et la main d'œuvre de l'étanchéité pour la toiture terrasse.

Tableau 3.9 – Coûts en € HT/m² des travaux associés aux planchers et à la toiture terrasse

Parois	Travaux	Isolant	Coût (€ HT/m²)
Planchers	Main d'œuvre isolation	EPS, LDV, LDR, FDB	10
		Paille	22,5
Toiture terrasse	Étanchéité et main d'œuvre d'isolation	Tous	49

3.2.3 Comparaison des variantes constructives

Des variantes de conception sont créées afin de réaliser une comparaison sommaire des systèmes constructifs en SED et en ACV. Le cas de base B-EPS reste identique tandis que les variantes B-LDV, B-LDR et B-FDB sont construites avec les mêmes épaisseurs d'isolant que dans le cas d'étude : 10 cm dans le mur extérieur du garage et 25 cm dans toutes les autres parois. La variante OB-P est construite avec 10 cm d'isolant dans le mur extérieur du garage (qui correspond à l'épaisseur disponible entre les montants en bois) et 25 cm d'épaisseur d'isolant dans la toiture terrasse. Les principaux résultats de la SED et du calcul économique sont indiqués dans le Tableau 3.10. Le coût de construction est partiel et comprend seulement les éléments énoncés liés à l'isolation, au système constructif, aux fenêtres et aux système solaire PV. Le cas de base B-EPS a le coût de construction partiel le plus faible suivi de près par les variantes B-LDR et B-FDB. La variante B-LDV est la plus chère des structures en béton à cause de l'installation d'un bardage en bois sur les murs extérieurs. La variante OB-P est la plus chère de ce classement à cause du coût de la structure en bois. Il est à noter que ces coûts sont utilisés à titre d'illustration de la démarche d'optimisation. Une étude économique approfondie est nécessaire pour pouvoir tirer des conclusions générales sur ces différentes variantes.

Tableau 3.10 – Caractéristiques principales des variantes du système constructif

Variante	Besoins chaud kWh/m².an	Consommation chauffage kWh/m².an	Consommation totale kWh/m².an	Coût de construction partiel €/m²
B-EPS	10,4	2,8	8,7	1026
B-LDV	11,4	3,0	8,9	1103
B-LDR	12,1	3,2	9,1	1033
B-FDB	14,0	3,6	9,5	1033
OB-P	18,5	4,6	10,6	1379

Les impacts totaux du cycle de vie de ces variantes sont comparés sur le graphe radar à la Figure 3.10. Les variantes B-FDB et OB-P ont les plus forts impacts sur l'occupation des sols à cause de l'activité forestière et agricole à l'origine de leurs matériaux biosourcés, avec respectivement 2,8 et 8,7 fois plus d'impact que le cas d'étude initial. Sur l'indicateur de dommages aux écosystèmes B-FDB et OB-P ont les impacts les plus élevés avec respectivement + 16 % et + 37 % par rapport au cas de base. Malgré leur plus faible émission de GES, notamment une réduction significative de 69 % par rapport au cas de base pour OB-P, l'occupation des sols contribue plus fortement aux dommages aux écosystèmes. Néanmoins, la variante OB-P est celle qui a la plus faible participation à l'épuisement des ressources minérales, le moins d'émission de particules fines et par conséquent (avec la plus faible contribution à l'effet de serre) les plus faibles dommages à la santé humaine (respectivement 12 %, 13 % et 30 % par rapport au cas de base).

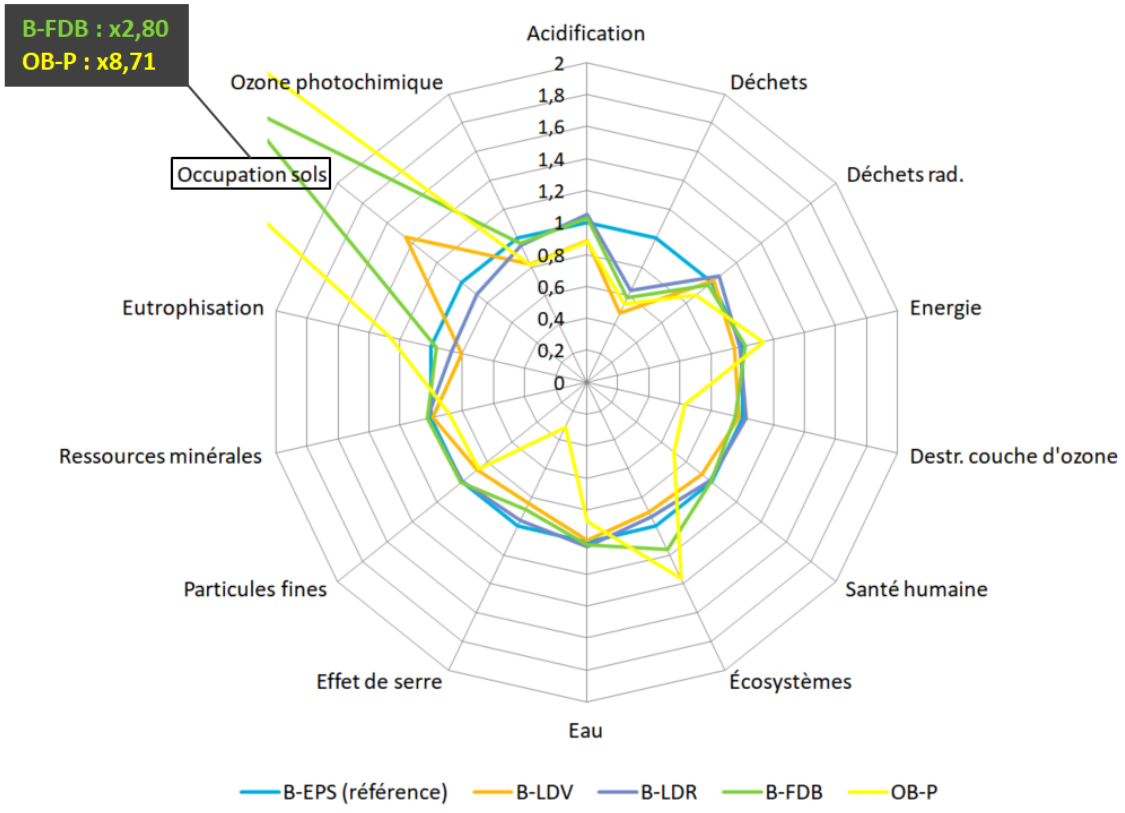


Figure 3.10 – Graphe radar des impacts totaux des variantes du système constructif avec B-EPS comme référence

Les émissions de GES par étape du cycle de vie sont indiquées à la Figure 3.11. Pour rappel l'électricité du mix français est peu carboné et influence l'étape d'utilisation. Les principales différences entres les variantes se situent dans les étapes de construction et de déconstruction. Dans la construction, la variante OB-P se distingue par une émission négative de GES (-2,6 $kgCO_2/m^2.an$) due au bilan carbone du bois certifié de la structure et, dans une moindre mesure, de la paille de l'isolation. Les variantes B-EPS et B-LDR émettent le plus de GES durant la construction (8 $kgCO_2/m^2.an$). La variante B-LDR est plus émettrice sur cette étape que B-LDV (6,42 $kgCO_2/kg$), malgré les quantités similaires d'isolants utilisées et les impacts de fabrication de 2 $kgCO_2/kg$ pour la laine de verre et 1,26 $kgCO_2/kg$ pour la laine de roche ; l'écart provient donc principalement de l'emploi d'un bardage en bois certifié dans B-LDV au lieu de l'enduit minéral extérieur dans B-LDR. Sur l'étape de déconstruction, les variantes les plus biosourcées se distinguent par de fortes émissions de GES dues à l'incinération. Dans l'émission totale de GES, la variante

B-EPS a le plus d'impact (11,3 $kgCO_2/kg$) devant B-LDR (10,9 $kgCO_2/kg$), B-FDB (10 $kgCO_2/kg$) et B-LDV (9,5 $kgCO_2/kg$). La variante OB-P est la moins impactante au total (3,5 $kgCO_2/kg$) grâce à l'hypothèse favorable d'usage de bois certifié.

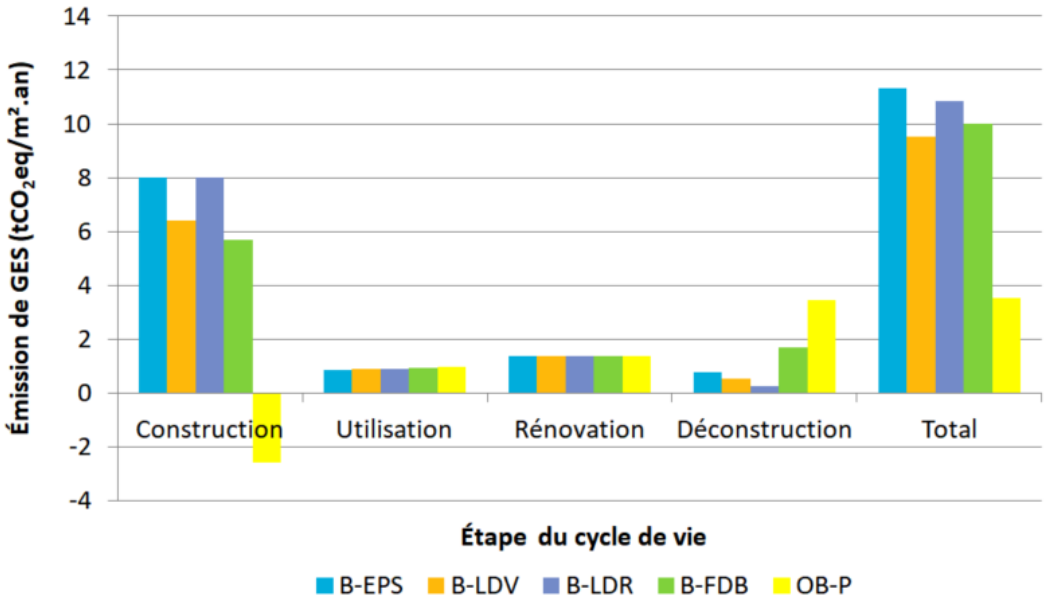


Figure 3.11 – Émission de GES par étape du cycle de vie des variantes du système constructif

3.2.4 Adaptation de l'algorithme d'optimisation

La complexification de l'espace de décision a des conséquences sur la description des gènes et des allèles dans l'algorithme d'optimisation génétique. Tout l'enjeu se trouve dans l'interfaçage entre les paramètres de conception du modèle de SED et la représentation génétique des solutions de conception :

- Dans le modèle de SED, il existe au total 31 paramètres de composition liés aux systèmes constructifs et aux isolants (voir la Figure 3.8 précédente). Ces paramètres ont une valeur unique (p. ex. l'isolation paille fixe) ou reflètent des valeurs différentes d'épaisseur d'isolant. Un paramètre supplémentaire « système constructif » détermine à quel système constructif appartient une variante de conception. Il indique ainsi au moteur de calcul quel ensemble de paramètres de composition doit être pris en compte dans la simulation de cette variante.

- Dans la description génétique, les paramètres de conception faisant varier l'épaisseur d'isolation sont regroupés par type de composition (p. ex. mur extérieur, combles), réduisant ainsi 31 variables indépendantes en 9 grands gènes. Un gène supplémentaire est considéré pour le paramètre indiquant le « système constructif » au modèle de SED.

Cette description génétique permet de répondre à une problématique de cohérence génétique. L'épaisseur d'isolation dans une paroi donnée doit être considérée comme une variable de décision unique et non pas distribuée sur les variantes constructives de ces parois. Le risque de cette dernière approche est une propagation d'allèles qui ne sont pas optimales à travers les générations et donc une mauvaise convergence de l'algorithme. Ce phénomène est illustré à la Figure 3.12. Elle présente une opération de croisement entre deux individus non-dominés dans deux situations liées au couplage ou non des paramètres d'épaisseur d'isolation. Dans le cas d'un croisement sans couplage, en situation *a)*, les parents lèguent à leurs enfants une caractéristique pour laquelle ils n'ont pas été sélectionnés initialement, en l'occurrence un paramètre d'épaisseur d'isolation qui était inactif d'un autre système constructif. Alors que les parents possédaient des valeurs d'épaisseur d'isolation proches (15 et 20 cm sur les paramètres actifs), les enfants héritent de valeurs d'épaisseurs d'isolation des paramètres inactifs et éloignées de celles de leurs parents (0 et 4 cm). Ces enfants se retrouvent dans une zone de l'espace de décision éloignée de celle de leurs parents ce qui affecte directement le taux de convergence de l'algorithme d'optimisation. Dans la situation *b)*, cette problématique est résolue par un couplage des paramètres d'épaisseur d'isolation dans un seul et unique gène. Les enfants héritent donc des bonnes épaisseurs d'isolation de leurs parents.

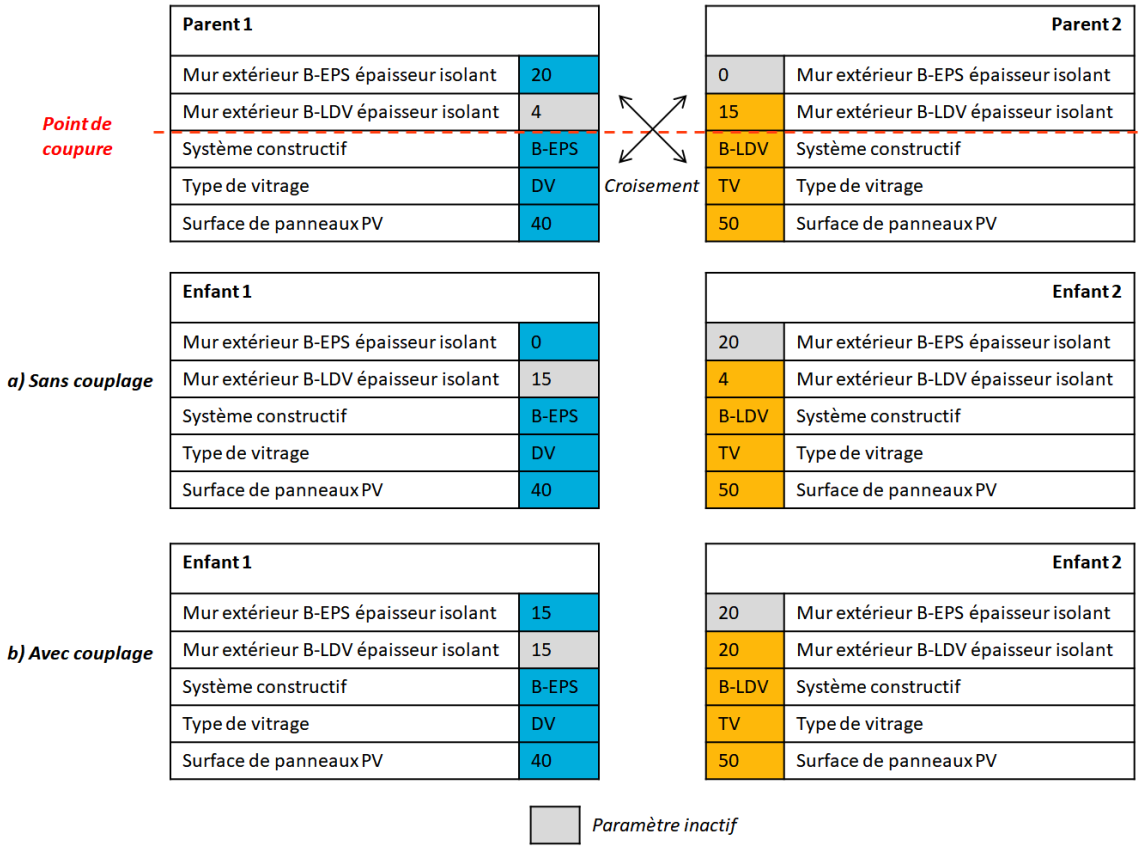


Figure 3.12 – Illustration de la problématique du couplage des paramètres de conception dans une opération de croisement à un point de coupure

Pour une mise en place simplifiée de cette solution de couplage, il est nécessaire que les niveaux de variation de l'épaisseur d'isolation soient les mêmes d'un système constructif à un autre. Cela a donc été un pré-requis qui a guidé la construction de l'espace de décision. Toutefois, la variante OB-P ne répond à cette exigence puisqu'elle induit des compositions avec une épaisseur d'isolation en paille fixée à 37 cm. Une unique valeur d'épaisseur d'isolation peut être décrite par un seul allèle de niveau 0 dans la représentation génétique. Cette configuration pose un problème dans les opérations de croisement puisque le parent de variante OB-P va léguer à son enfant un allèle de niveau 0 à chaque reproduction et lui imposer une épaisseur minimale d'isolation en cas de changement de système constructif. Cet héritage est totalement arbitraire et ne reflète aucune logique génétique. La solution consiste à étendre de manière fictive le nombre d'allèles correspondant à l'épaisseur d'isolation de la variante OB-P, tout en conservant

l'épaisseur unique de 37 cm. Le parent OB-P transporte ainsi avec lui une « mémoire génétique ». Il peut léguer à son enfant l'allèle d'un de ses ancêtres dominant et participer à l'évolution génétique de la population. La Figure 3.13 illustre les solutions de couplage des paramètres de conception et d'extension des allèles de la variante OB-P.

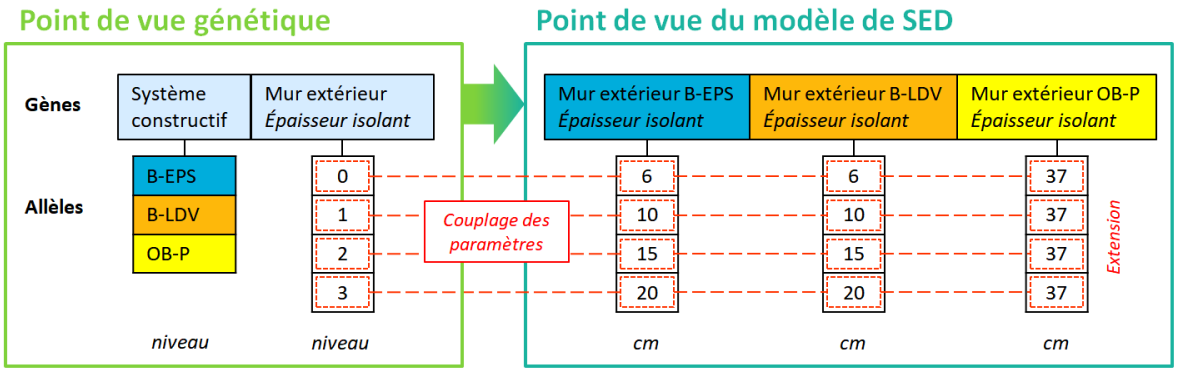


Figure 3.13 – Exemple du couplage de paramètres de conception et de l'extension des allèles associées aux compositions de la variante OB-P

3.2.5 Analyse des résultats

Les caractéristiques du POM sont données dans le Tableau 3.11. L'influence des échantillonnages aléatoire et par séquence de Sobol sera testée dans cette partie, puis la comparaison des solutions optimales avec le POM précédent. Le nombre de générations et d'individus est inchangé.

Tableau 3.11 – Caractéristiques du problème d'optimisation complet

Nom du problème	POM complet		
Nb. individus	200	Taux de croisement	0,9
Nb. générations	40	Taux de mutation	0,15
Échantillonnage	Aléatoire et Sobol	Espace de décision	Complet
Fonctions objectif	$\begin{cases}\min f_1(x) = GES_{tot}(x) \\ \min f_2(x) = C_{const}(x)\end{cases}$	Contrainte	$E_{\text{elec}}(x) > 0$

3.2.5.1 Comparaison des hypervolumes

Un indicateur de la qualité des solutions du front de Pareto est l'hypervolume (aussi appelé mesure de Lebesgue ou *S-metric* en anglais) qui est calculé à partir d'un point de référence et des valeurs sur les fonctions objectif des solutions d'un front non-dominé. L'hypervolume peut être défini comme l'espace des objectifs couvert par les solutions d'un front relativement à un point de référence. À chaque solution d'un front non-dominé est associée une mesure de sa contribution à l'hypervolume du front appelée « hypervolume exclusif » Figure 3.14. À mesure que le front de Pareto progresse de génération en génération, la valeur d'hypervolume totale augmente. Cette progression ralentit puis se stabilise lorsque l'algorithme d'optimisation atteint le front de Pareto global.

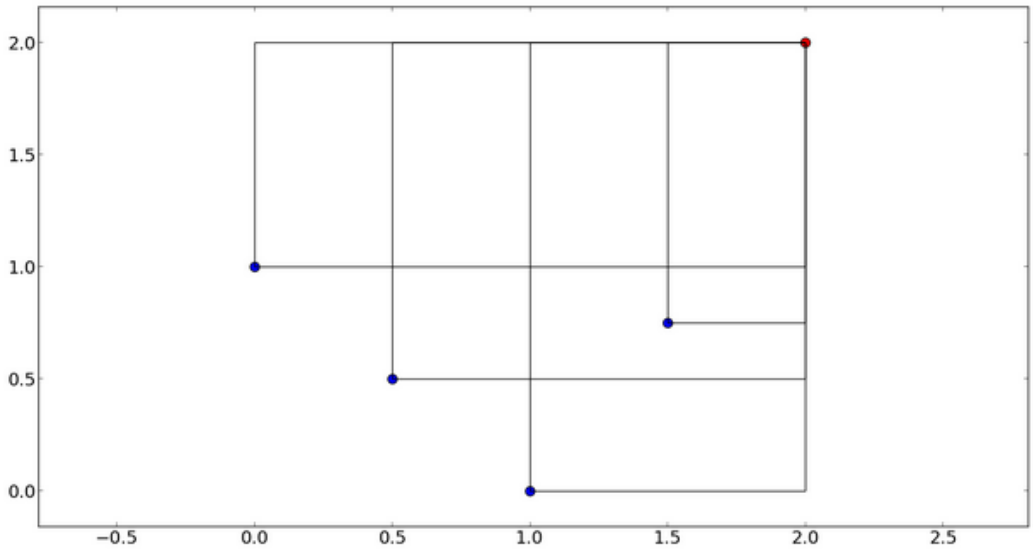


Figure 3.14 – Représentation des hypervolumes exclusifs de solutions (bleu) par rapport à un point de référence (rouge)

L'évolution de l'hypervolume des deux « POM Complets » est illustrée à la Figure 3.15. Le point de référence considéré dans le calcul de l'hypervolume est le même pour les deux POM et correspond à un point Nadir calculé à partir des valeurs objectif de toutes les solutions explorées par les deux optimisations et des valeurs objectifs de la conception initiale. L'influence de la méthode d'échantillonnage est la suivante : la population générée par la séquence de Sobol possède un front déjà avancé tandis que la population générée aléatoirement ne possède pas de solution valide (qui respecte la contrainte) qui puisse

générer un front et a donc un hypervolume nul. La courbe correspondant à la méthode aléatoire montre toutefois un « bond » important de l'hypervolume à la 1ère et à la 3ème génération. Finalement, l'avance apportée par la méthode de Sobol n'améliore pas la convergence globale sur ce POM puisque les hypervolumes se rejoignent après 6 générations, bien avant d'avoir atteint la convergence qui se situe à partir de la 35ème génération. Cette comparaison ne montre pas d'influence significative de la méthode d'échantillonnage dans la convergence comparée au critère d'arrêt du nombre de générations maximum. D'autres comparaisons permettraient d'analyser plus exhaustivement la robustesse de l'algorithme à la variabilité de la population initiale. Dans la suite est considéré seulement le POM Complet basé sur la méthode de Sobol.

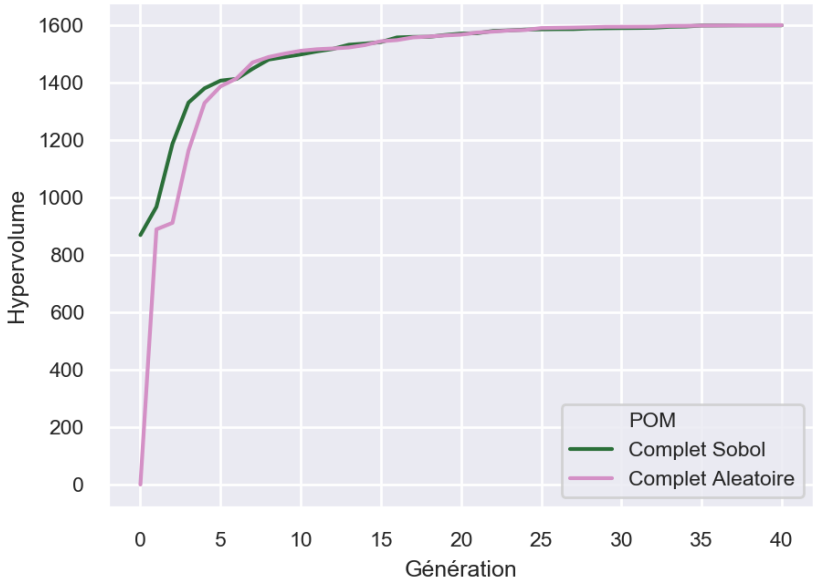


Figure 3.15 – Évolution de l'hypervolume de trois POM

3.2.5.2 Caractéristiques des solutions

La comparaison des fronts issus du POM Simple et du POM Complet montre que la définition de l'espace de décision peut avoir une influence importante dans les caractéristiques des solutions optimales. À la Figure 3.16, le front de Pareto issu du POM Complet (en vert) domine le front de Pareto issu du POM Simple (en bleu) tout en proposant une plus grande diversité de solutions en termes de coût de construction et de réduction d'émission de GES totale. Le front de Pareto Complet peut être divisé en 4 zones

distinctes dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 3.12. Chaque zone comprend des solutions optimales d'un seul type de système constructif : la zone 1 contient 59 solutions de type B-FDB, la zone 2 contient 10 solutions de type B-LDR, la zone 3 contient 10 solutions de type B-LDV et la zone 4 contient 10 solutions de type OB-P.

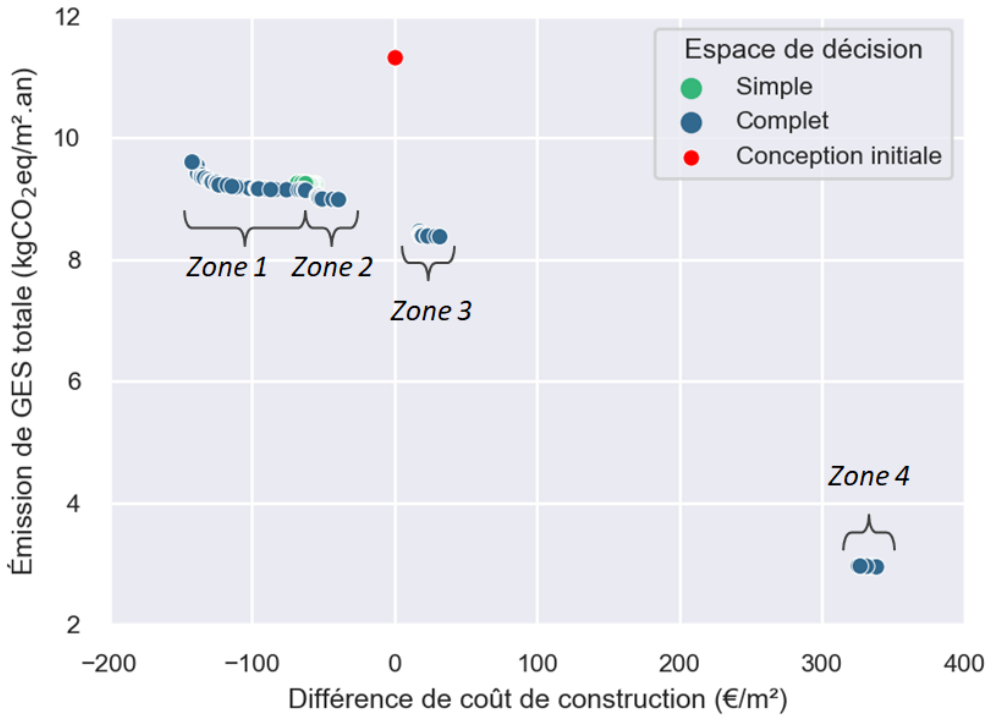


Figure 3.16 – Comparaison des fronts du POM Simple et du POM Complet

Tableau 3.12 – Caractéristiques générales des zones du front de Pareto global

Zone	Système constructif	Nombre de solutions	Différence de coût de construction (€/m²)	Émission de GES (kgCO2/m².an)	Bilan Ef (kWh/m².an)
Zone 1	B-FDB	59	-141 à -62	9,5 à 9,1	0 à 9,4
Zone 2	B-LDR	10	-53 à -40	9,0	0 à 10,5
Zone 3	B-LDV	10	+18 à +33	8,4	0,2 à 11
Zone 4	OB-P	10	+325 à +338	3,0 à 2,9	0,4 à 10,7

Les quatre zones correspondent à quatre budgets de construction distincts, du moins cher basé sur la construction en béton et l'isolation en fibre de bois, au plus coûteux mais le moins impactant en terme d'émission de GES basé sur la construction bois-paille. Cette distinction peut apporter une première aide à l'écoconception en connaissant le budget disponible du décideur. Les caractéristiques des solutions optimales des quatre zones sont analysées dans la suite.

Les répartitions des besoins de chauffage, de la production PV et du bilan zéro-énergie/BEPOS parmi les solutions des zones d'optimum local sont données à la Figure 3.17. La zone 1 présente une grande variabilité des besoins de chauffage dont les valeurs décroissent avec le coût de construction de 65 à 30 kWh/m².an. Les solutions des autres zones d'optimums locaux, partagent des besoins de chauffage autour de 26 kWh/m².an avec une faible dispersion. En ce qui concerne la production PV, en zone 1 l'investissement supplémentaire dans les solutions du front est dirigé en priorité vers la réduction des besoins de chauffage tandis que la production PV est une variable d'ajustement permettant de répondre à la contrainte du bilan zéro-énergie. Dans cette zone des solutions les moins chères le front semble ne pas avoir convergé totalement. Dans les zones 2, 3 et 4, la tendance est différente : avec des besoins de chauffage ayant déjà un atteint un niveau optimal dans le cadre du POM, l'investissement supplémentaire est dirigé vers une augmentation de la surface de panneau solaire PV entre 51,6 et 66,5 m². Dans chaque front local, l'investissement supplémentaire se traduit par un meilleur bilan BEPOS, que cela passe par l'amélioration de la performance thermique ou l'installation de panneaux solaires PV supplémentaires.

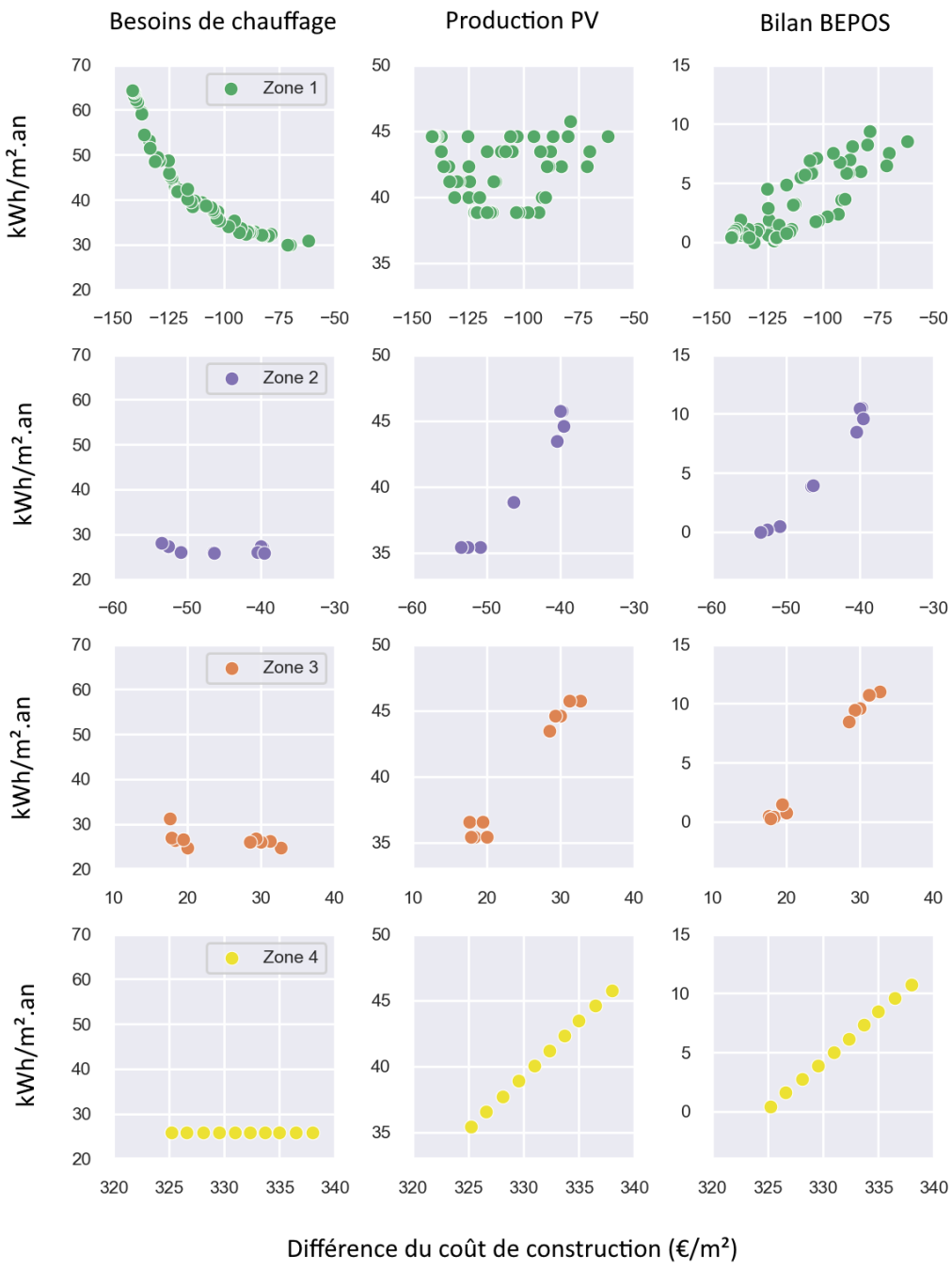


Figure 3.17 – Évolutions des besoins de chauffage, de la production PV et du bilan zéro-énergie/BEPOS en fonction du coût de construction des solutions des optimums locaux

Les cartes de chaleurs des Figure 3.18 et Figure 3.19 permettent d'analyser la répartition des épaisseurs d'isolant parmi les solutions, par parois et dans chaque zone d'optimum local. Dans la zone 1, certaines parois se démarquent par une épaisseur d'isolant optimale dans la quasi-majorité des solutions : les murs extérieurs des combles et du garage avec aucun isolant puisqu'ils font partie de locaux non chauffés, ainsi que les planchers sur terre-plein et sur vide sanitaire avec une épaisseur d'isolant de 6 cm qui est le minimum autorisé. Les autres parois (mur extérieur, combles, toiture terrasse, mur intérieur sur VS) montrent une dispersion dans la distribution des épaisseurs d'isolant qui induit une variabilité des besoins de chauffage des solutions. Dans les zones 2 et 3, les épaisseurs optimales sont plus distinctes avec une variabilité de l'isolation seulement dans les combles (entre 12 et 20 cm) et la toiture terrasse (autour de 9 cm). L'isolation des autres parois correspond aux épaisseurs minimales autorisées par l'espace de décision tout en conservant les besoins de chauffage entre 24 et 30 kWh/m².an (Figure 3.17 précédente). En ce qui concerne la zone 4 et ses solutions de type ossature bois et paille, la plus grande variabilité de l'isolation se trouve dans la toiture terrasse et le mur extérieur du garage (qui ne peut varier qu'entre deux valeurs possibles) mais dont les variations n'ont pas d'incidence sur les besoins de chauffage qui restent stables. L'isolation du plancher bas est dans tous les cas de 6 cm.

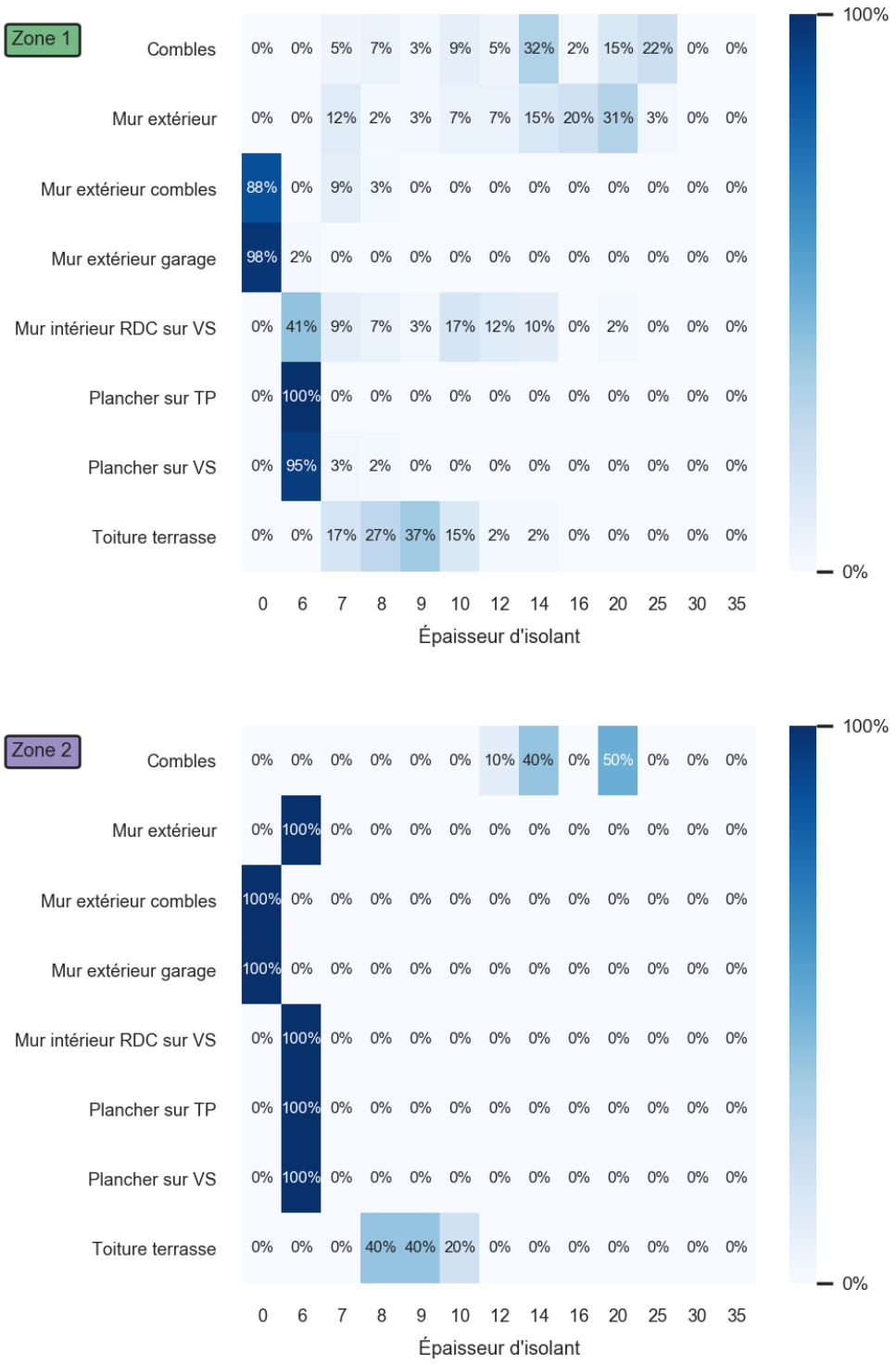


Figure 3.18 – Carte de chaleur des épaisseurs d'isolant dans les solutions (zones 1-2)

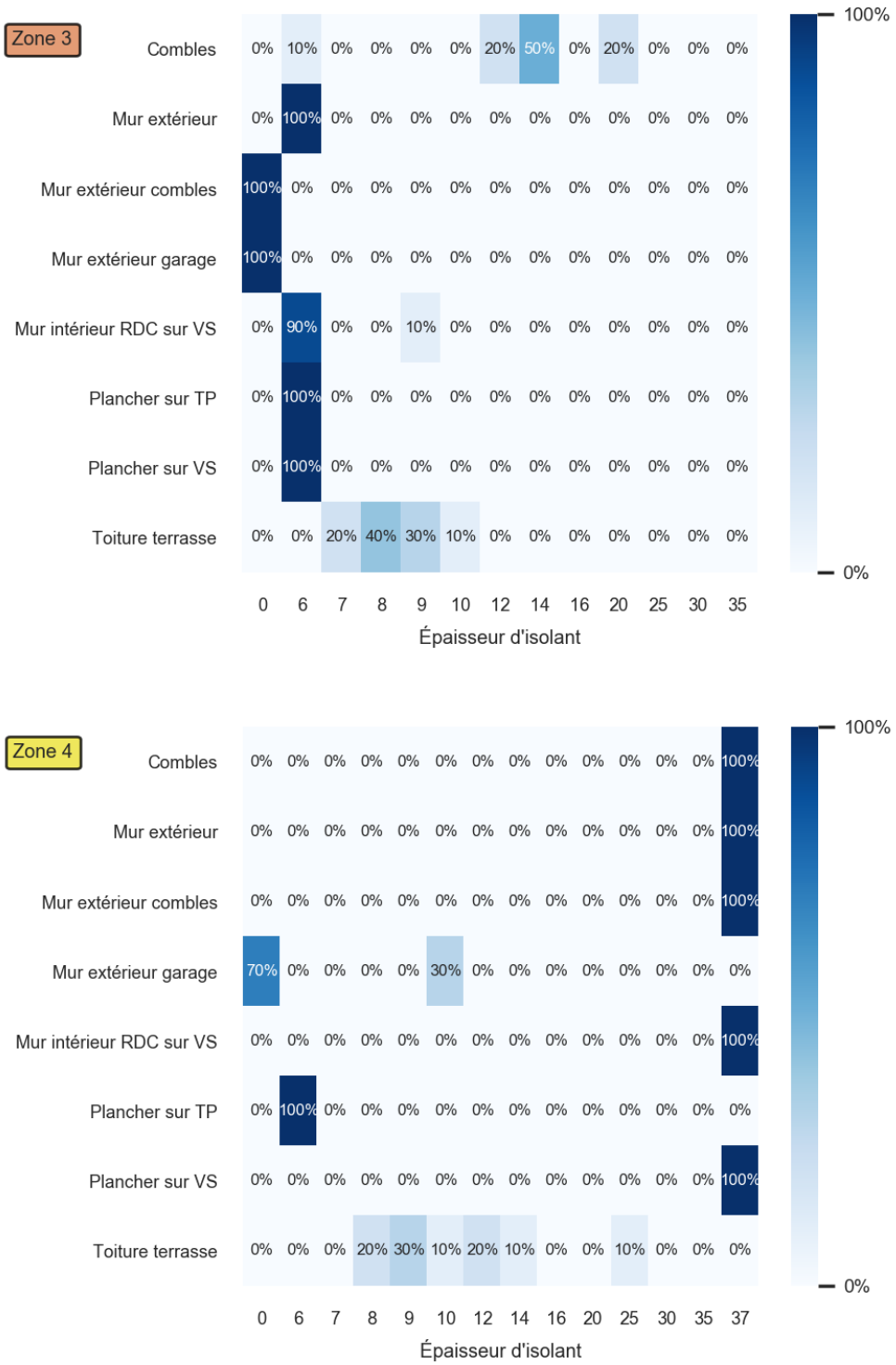


Figure 3.19 - Carte de chaleur des épaisseurs d'isolant dans les solutions (zones 3-4)

Les cartes de chaleurs suivantes illustrent les distributions des types de vitrage et de la variation de leur surface (Figure 3.20 et Figure 3.21). Ils montrent une même tendance forte dans l'ensemble du front global qui est l'installation de double vitrage sur les façades orientées à l'Est, au Nord et au Sud ainsi que la diminution des surfaces vitrées sur toutes les façades (30 %). Sur la partie Ouest, l'usage de triple vitrage est majoritaire dans les zones 1 et 2 et compte pour 30 % des solutions de la zone 3. Cette tendance peut s'expliquer par la très mauvaise exposition de la partie de façade sur laquelle est positionnée la fenêtre, illustrée à la Figure 3.22. Les apports solaires étant négligeables, il est plus favorable d'un point énergétique et environnemental d'installer une fenêtre en triple vitrage mieux isolée malgré un surcoût qui sera relativement faible en raison de la petite surface de cette fenêtre (1,2 m²). Dans l'absolu, et d'un point de vue empirique, l'optimalité pourrait être de supprimer cette fenêtre mais cette possibilité n'est pas explorable par l'algorithme. Des développements en optimisation morphologique permettraient de prendre en compte ce type de modification de l'enveloppe.

Généralement, l'usage de double vitrage (qui possède un coefficient U_w de 1,3W/m².K) à la place du triple vitrage (U_w de 0,85 W/m².K) réduit le coût de la construction aux dépens d'une moindre isolation de l'enveloppe. La réduction de la surface vitrée réduit également le coût de l'enveloppe car 1 m² de mur vaut moins cher (entre 198 €/m² et 226 €/m² dans les variantes B-FDB, B-LDR et B-LDV) que 1 m² de vitrage (230 €/m² de double vitrage et 270 €/m² de triple vitrage). Dans la zone 4, qui comprend les solutions de type OB-P, le coût du mur extérieur est plus élevé que le coût d'une fenêtre triple vitrage (298 €/m² contre 270 €/m²), ce qui pourrait se traduire par un optimum économique tourné vers l'installation de plus grandes surfaces vitrées et la possibilité d'avoir du triple vitrage pour limiter la perte d'isolation en comparaison à une surface de mur. Les Figure 3.20 et Figure 3.21 montrent la tendance inverse parmi les solutions de la zone 4 où les surfaces vitrées sont minimisées et uniquement de type double vitrage. Cette tendance n'est pas cohérente économiquement mais elle l'est sur l'objectif de réduction de l'effet de serre puisque le mur extérieur de type bois-paille apporte un bénéfice sur son cycle de vie de 37,7 $kgCO_2/m^2$ contre un impact du cycle de vie de 57 $kgCO_2/m^2$ pour un double vitrage en PVC.

De façon générale, les parois ont des émissions de GES moins élevées que les fenêtres. Par exemple, le mur extérieur de la variante B-LDR avec une isolation de 25 cm, a une émission de GES sur son cycle de vie de 93 $kgCO_2/m^2$ de parois. En comptant les 3 remplacements durant la vie du bâtiment, les fenêtres double et triple vitrage en PVC émettent respectivement 228 et 280 $kgCO_2/m^2$ de surface vitrée. Du point de vue des objectifs et des contraintes imposées à l'algorithme d'optimisation multicritère, il est plus avantageux de réduire les surfaces vitrées et d'installer du double vitrage, sauf dans le cas particulier d'un vitrage très mal exposé qui nuirait à la performance thermique de l'enveloppe et à l'émission de GES durant l'étape d'utilisation.

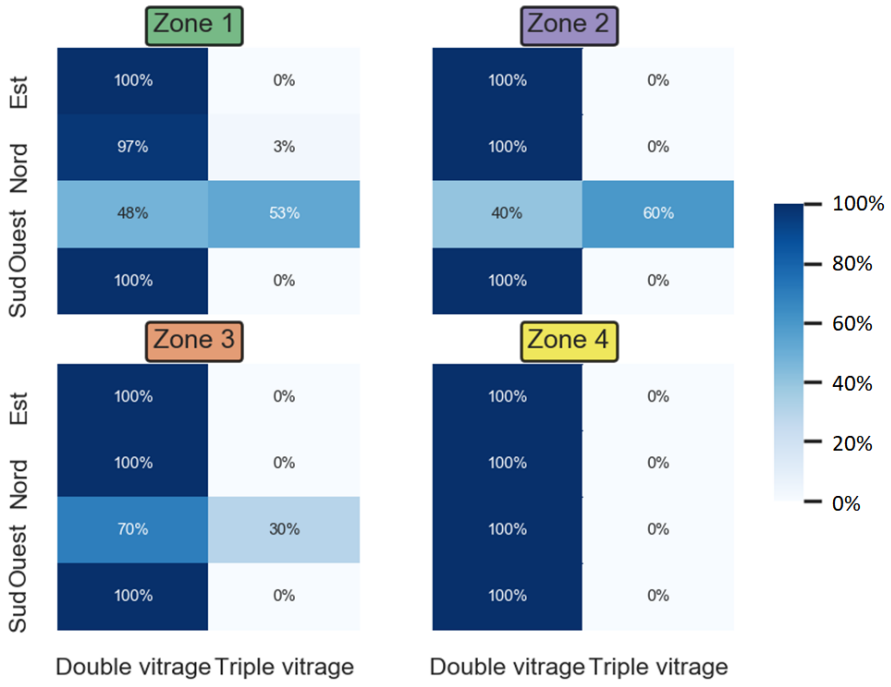


Figure 3.20 – Répartition des types de vitrage parmi les solutions des zones d'optimum local

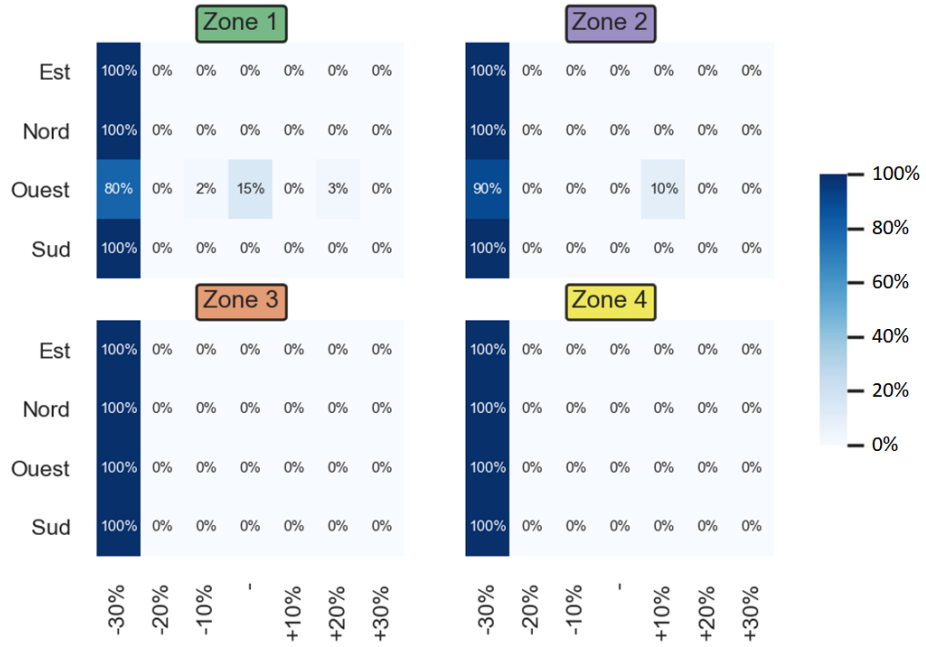


Figure 3.21 – Carte de chaleur du changement de surface vitrée par orientation dans les solutions des zones d'optimum local

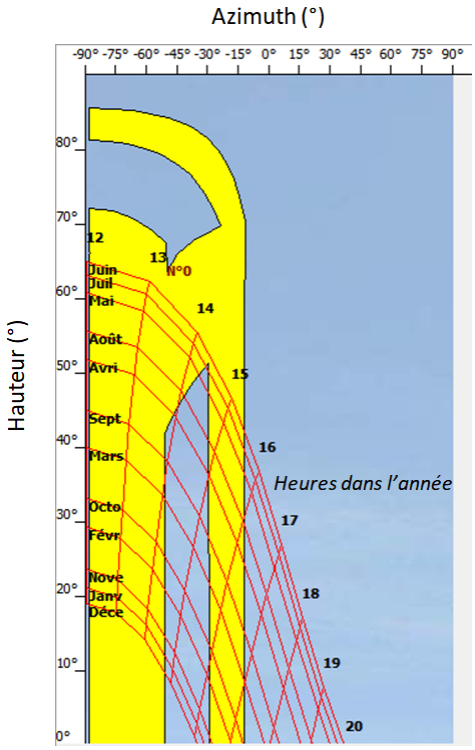


Figure 3.22 – Masque visible depuis la fenêtre Ouest durant l'année

3.2.6 Choix d'une solution optimale

L'analyse des résultats a permis de mettre en lumière les stratégies de conception découvertes par l'algorithme. D'après cette analyse, des recommandations d'écoconception **propres à ce POM** peuvent être faites :

- le choix optimal d'un des types d'isolant et de système constructif en fonction du budget de construction disponible ;
- des exigences sur la performance thermique de l'enveloppe moins élevées que dans le standard passif, majoritairement entre 24 kWh/m².an et 40 kWh/m².an ;
- l'installation d'une large surface de panneaux solaires PV, entre 51,6 et 66,5 m² ;
- la minimisation des surfaces vitrées et l'installation de double vitrage performant dès que possible.

Il est important de rappeler qu'il ne s'agit pas de règles de conception générales mais bien de celles qui sont propres au cas d'étude et au problème d'optimisation multicritère qui a été défini.

La visualisation par coordonnées parallèles est un outil puissant d'aide à la décision multicritère et multidimensionnelle qui a déjà été utilisé dans des contextes de conception de bâtiment (Østergård et al., 2017 ; Østergård et al., 2017 ; Jusselme et al., 2017). Elle permet de voir facilement les relations et les corrélations entre des paramètres ainsi que les compromis et les synergies entre plusieurs objectifs. Les coordonnées parallèles comportent plusieurs dimensions distribuées horizontalement dont les valeurs possibles sont représentées sur des axes verticaux. Le nombre de dimensions pouvant être affichées est illimité mais en pratique s'arrête aux possibilités d'affichage de l'écran. La force de cet outil de visualisation est son interactivité en temps réel qui permet la prise d'information rapide sur l'espace de décision et des objectifs. Dans un processus itératif le décideur peut filtrer les valeurs des paramètres et des objectifs en fonction de ses préférences et converger petit à petit vers les solutions qui lui conviennent le mieux. Une application des coordonnées parallèles au front de Pareto global est affichée à la Figure 3.23.

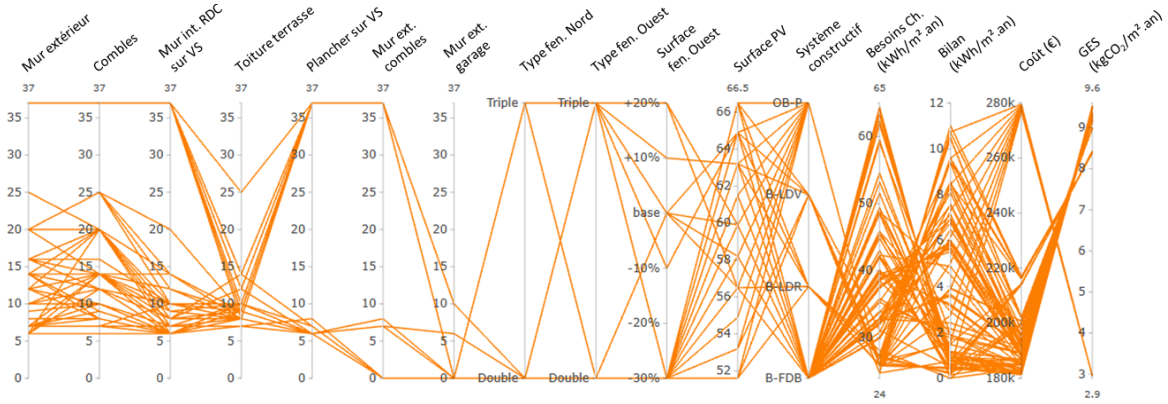


Figure 3.23 – Coordonnées parallèles pour la visualisation des solutions du front de Pareto global

Pour illustrer l'utilisation des coordonnées parallèles dans le cadre d'une optimisation multicritère, plusieurs exemples de décision possibles sont testés. Elles expriment les préférences des décideurs fictifs suivants :

- Décideur A : un bilan strictement zéro-énergie, avec les besoins de chauffage les plus faibles et pour un coût de construction le moins cher possible ;
- Décideur B : un bilan BEPOS le plus élevé possible pour un budget moyen ;
- Décideur C : un bâtiment à ossature bois et isolation paille avec une grande surface de panneaux solaires PV.

L'expression de ces choix *via* les coordonnées parallèles est illustrée à la Figure 3.24 et permet d'identifier trois solutions A, B et C. Ces solutions ont une différence de coût de construction avec le cas initial de respectivement -53 €/m², +38 €/m² et +338 €/m². Le graphe radar à la Figure 3.25 compare l'ACV de ces solutions avec celle de la conception initiale. Les solutions A, B et C sont globalement meilleures que le cas initial sur de nombreux impacts, en particulier les indicateurs des déchets radioactifs, de l'énergie primaire, de l'eau utilisée et de la destruction de la couche d'ozone qui sont fortement influencés par la plus grande production d'électricité PV de l'étape d'utilisation. Les solutions B et C qui sont d'un niveau BEPOS élevé ont même un impact négatif sur la production de déchets radioactifs. La solution C de type « bois paille » est la meilleure sur

la santé humaine, l'eau et les déchets radioactifs. Bien qu'il s'agisse aussi de la solution avec la plus faible émission de GES identifiée par l'algorithme d'optimisation, l'impact très important des matériaux biosourcés sur l'occupation des sols en fait la pire solution de la comparaison en termes de dommages aux écosystèmes, avec +23 % d'impacts par rapport au cas initial.

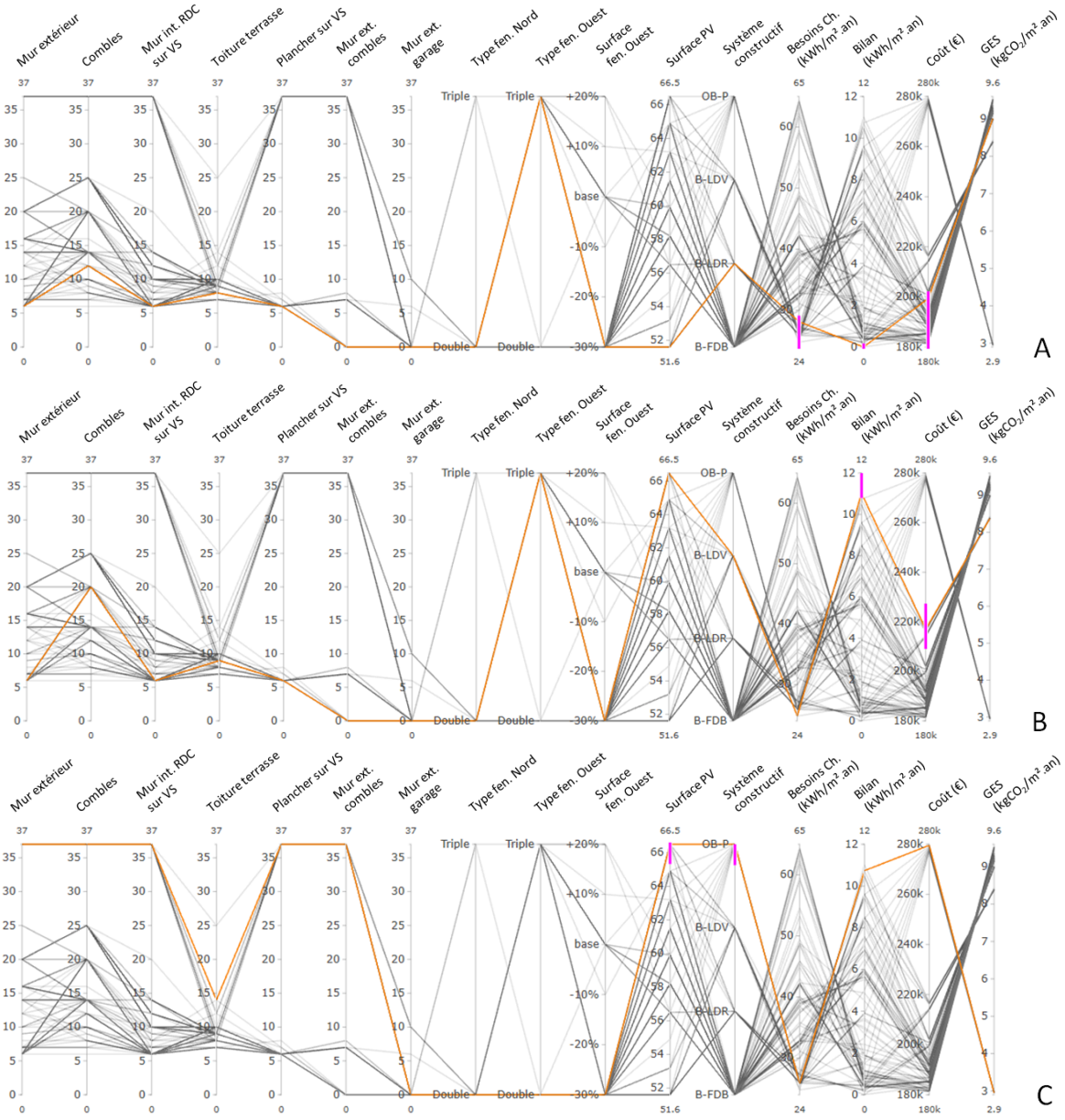


Figure 3.24 – Coordonnées parallèles et choix de trois décideurs A, B et C dans une prise de décision *a posteriori* de l'optimisation multicritère

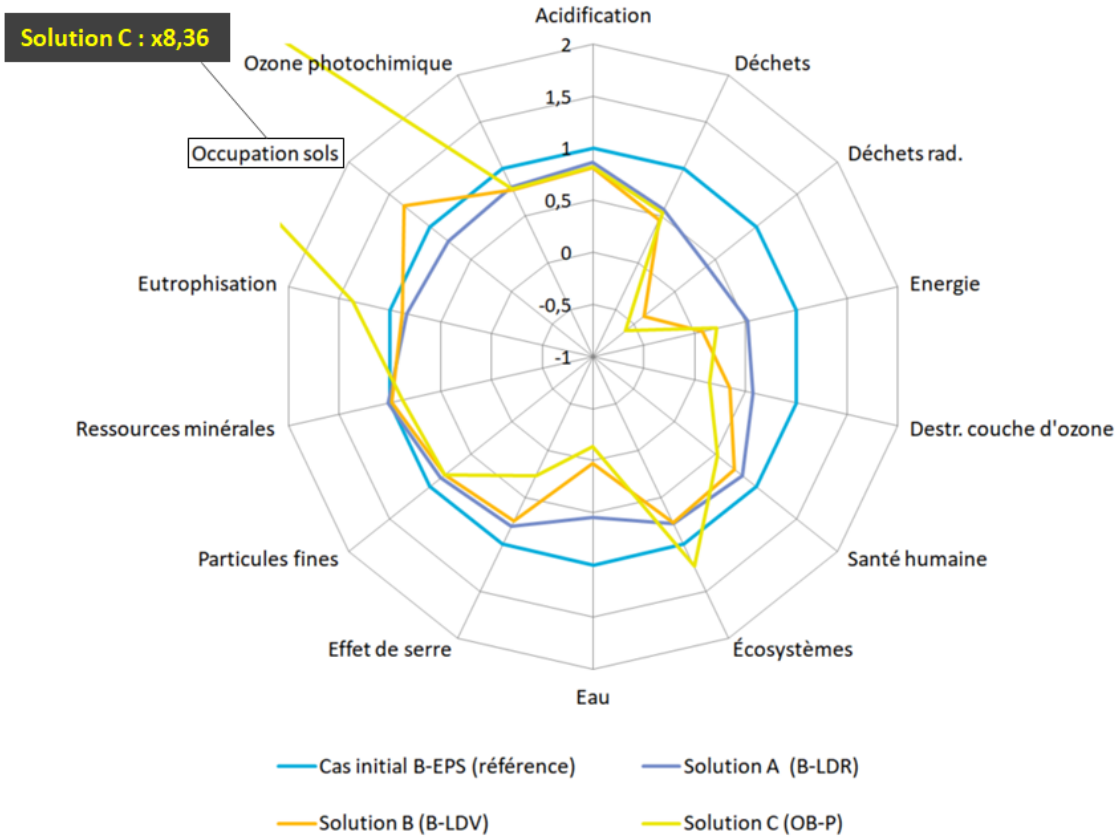


Figure 3.25 – Graphe radar des impacts environnementaux des solutions optimales A, B et C, et comparaison avec le cas initial

3.2.6.1 Données d'inventaire de la paille

Les données d'inventaire de la paille initialement implémentées dans la base de données d'EQUER proviennent de la fiche ecoinvent 3.4 « *market for straw, stand-alone production* » qui correspond à une production de paille indépendante, qui n'est pas issue d'une culture agricole alimentaire. Dans ce cas de figure, tous les impacts qui proviennent de l'activité agricole (occupation des sols, eau utilisé, utilisation de machines, etc.) sont allouée à l'unité fonctionnelle de la paille. En réalité, il est bien plus courant que la paille utilisée dans la construction soit un co-produit d'une culture principale, par exemple de blé. Pour évaluer la sensibilité de ce choix dans les impacts des variantes précédentes, une comparaison est faite avec données d'inventaire pour de la paille co-produite qui correspondent à la fiche ecoinvent 3.4 « *market for straw* ». Les données d'impact des deux fiches sont présentées dans le Tableau 3.13. La paille co-produite présente une

occupation des sols plus faible, ce qui peut être lié à l'allocation de l'usage des sols majoritairement aux céréales qui sont produites. En revanche, sur l'indicateur d'effet de serre, la paille co-produite apporte un bénéfice quasiment nul comparée à la paille produite principalement. Il est aussi intéressant de noter le bénéfice apporté par la paille produite principalement sur l'indicateur de santé humaine, tandis que la paille co-produite y engendre un impact. Cela peut être lié à la différence d'émission de GES.

La Figure 3.26 offre une visualisation des différences d'impacts entre ces données d'inventaire. Les indicateurs d'effet de serre et de la santé humaine n'y sont pas représentés à cause des signes négatifs de leurs valeurs.

L'influence de cette incertitude est évaluée en calculant une variante de la solution C (OB-P) qui inclut de la paille co-produite. Cette variante est comparée avec les solutions des décideurs sur le graphe radar à la Figure 3.27. Cette comparaison montre que l'usage de la paille co-produite induit une nette différence dans l'occupation des sols du bâtiment avec des impacts inférieurs de 30 % par rapport à la variante qui utilise de la paille cultivée indépendamment. À l'inverse, les impacts sur l'effet de serre sont plus importants dans le cas d'un usage de la paille co-produite mais ne modifient pas l'ordre des variantes. Ces deux aspects se compensent pour finalement aboutir à des dommages similaires sur les écosystèmes. L'interprétation de ces résultats est limitée : l'impact indirect de l'occupation des sols pour la production unique de la paille n'est pas pris en compte. En lui allouant spécifiquement des surfaces agricoles, la production de paille entre en compétition avec la production alimentaire et peut engendrer de manière indirecte un usage des sols ailleurs. Cet exemple illustre néanmoins une forme d'incertitude liée au choix des données d'inventaire.

Dans la suite, la donnée d'inventaire de la paille produite indépendamment est conservée.

Tableau 3.13 – Données d'impact des inventaires de la production principale de paille (« *stand-alone production* ») et de la paille co-produite

1 kg de Paille	Unité	market for straw, stand-alone production	market for straw
Acidification	kg SO_2 éq.	6,5e-07	9,1e-07
Déchets	kg	2,1e-02	2,0e-02
Déchets rad.	m3	1,5e-09	5,1e-10
Énergie	MJ	1,8e+01	1,2e+00
Destr. couche d'ozone	kg CFC-11 éq.	8,2e-09	3,7e-09
Santé humaine	DALY	-1,4e-06	1,8e-06
Écosystèmes	PDF.m².an	7,4e-01	6,7e-01
Eau	m^3	7,8e+00	2,8e+01
Effet de serre	kg CO_2 éq.	-1,5e+00	-5,2e-03
Particules fines	kg PM2,5 éq.	2,7e-05	3,4e-05
Ressources minérales	kg épuisées	4,5e-03	1,3e-03
Eutrophisation	kg éthylène éq.	1,8e-04	3,5e-05
Occupation sols	m².an	1,4e+00	1,2e-01
Ozone photochimique	kg PO_4 éq.	5,3e-04	1,8e-04

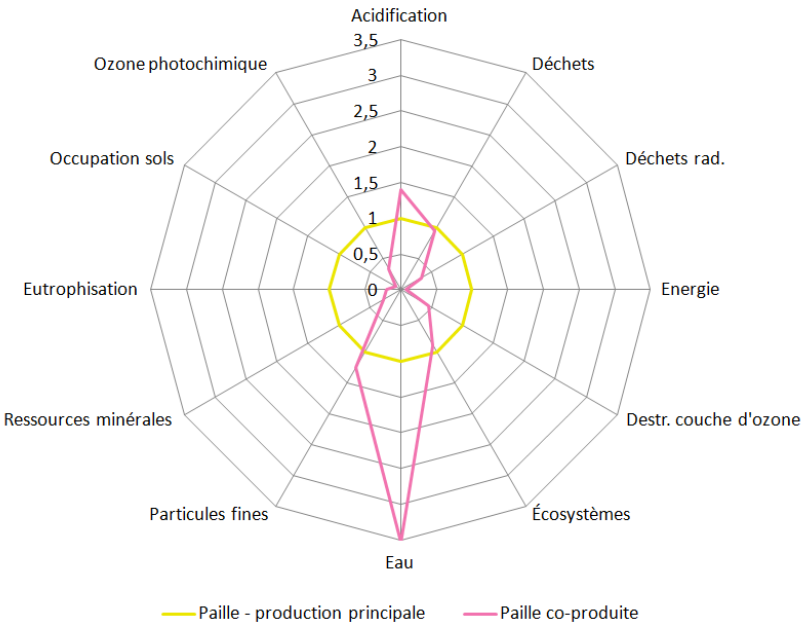


Figure 3.26 –Impacts de 1 kg de paille produite principalement et 1 kg de paille co-produite

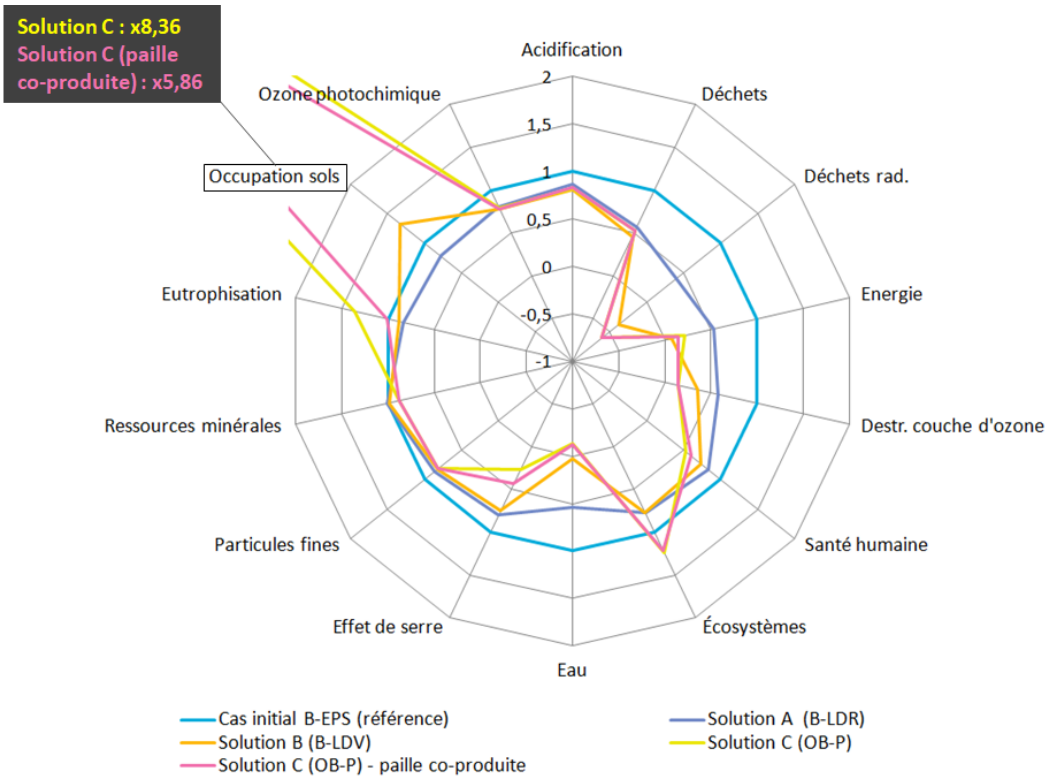


Figure 3.27 – Graphe radar comparant la solution C (OB-P) incluant de la paille co-produite avec les solutions initiales des décideurs

3.2.6.2 Évaluation de l'usage direct des sols

Dans la méthode de calcul initiale d'EQUER, l'emprise au sol du bâtiment est pris en compte dans une approche quartier mais pas dans une approche du bâtiment seul. L'usage direct des sols par le bâtiment est calculé afin d'identifier son influence en comparaison de variantes constructives. L'emprise au sol du cas d'étude est estimée à 185 m² pendant 80 ans en ne prenant pas en compte les porches et les escaliers extérieurs qui ne rentrent pas dans l'unité fonctionnelle. La surface habitable est de 205 m² étant donnée la présence d'un vide sanitaire. Les facteurs de caractérisation de la transformation et de l'occupation des sols choisis pour évaluer le bâtiment sont donnés dans le Tableau 3.14.

Tableau 3.14 – Facteurs de caractérisation de la transformation et de l'occupation des sols pour le cas d'étude

Flux d'inventaire	Unité	Facteur de caractérisation *endpoint* (PDF.m².an)	Usage direct des sols par le bâtiment durant son cycle de vie (185 m² et 80 ans) (PDF.m².an/m².an)
Occupation, urban, discontinuously built	m².an	0,415357	0,37
Transformation from grassland, natural (non-use)	m²	0	0
Transformation to urban discontinuously built	m²	169	1,91

L'influence de la prise en compte de l'usage des sols sur l'indicateur *midpoint* de l'occupation des sols et l'indicateur *endpoint* des dommages aux écosystèmes est donnée pour chaque variante dans le Tableau 3.15. La transformation des sols est comptée au niveau *endpoint* mais n'est pas calculée explicitement au niveau *midpoint*. L'usage direct des sols augmente fortement les impacts des variantes en béton sur l'indicateur d'usage du sol avec des augmentations de 63 à 108 %. Sur les variantes de type OB-P cette

augmentation est plus faible en raison d'un usage indirect des sols déjà élevé. L'augmentation des dommages aux écosystèmes est conséquente : de 45 % pour les variantes à ossature bois à 72 % pour les conceptions optimales en béton.

Tableau 3.15 – Influence de la prise en compte de l'usage direct des sols par variante

Variante	Occupation du sol *midpoint* (m².an/m².an)	Dommages aux écosystèmes (PDF.m².an/m².an)
Cas initial B-EPS	+ 84 %	+ 55 %
Solution A (B-LDR)	+ 108 %	+ 72 %
Solution B (B-LDV)	+ 63 %	+ 72%
Solution C (OB-P)	+ 10 %	+ 45 %
Solution C (OB-P) - paille co-produite	+ 14 %	+ 46 %

La Figure 3.28 montre la contribution de l'usage direct des sols dans les dommages totaux aux écosystèmes. Il contribue de 36 à 42 % des dommages dans le cas des variantes en béton et à hauteur de 31 % des dommages dans le cas de la construction bois paille en raison de la contribution relative plus importante des usages indirects des sols sur cet indicateur. L'usage direct des sols a une contribution très importante dans le cas d'une maison à cause du faible ratio de surface habitable par surface au sol. Dans le cas d'un quartier d'immeubles, Cohen et al. (2019) ont identifiés une contribution de l'usage direct des sols de seulement 2 % aux dommages aux écosystèmes totaux. Cette différence est directement liée au nombre d'étages et à la morphologie du bâtiment.

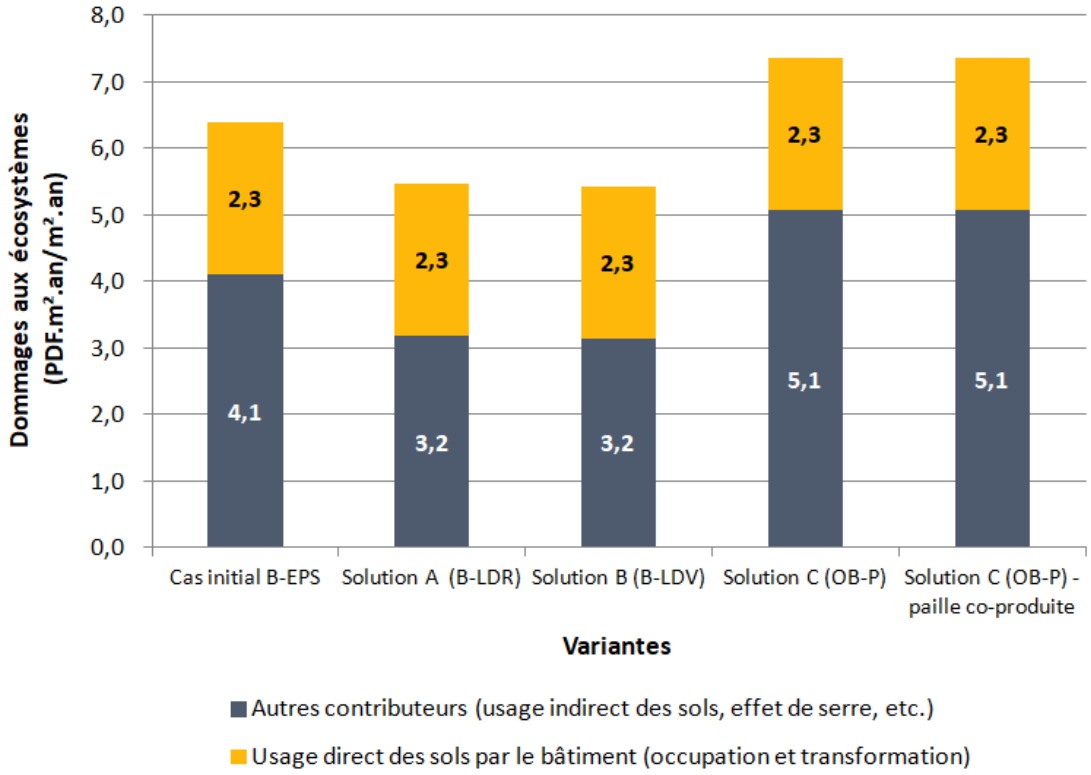


Figure 3.28 – Part de l'usage direct des sols dans les dommages aux écosystèmes dans plusieurs variantes d'une maison

Enfin, l'influence de l'usage direct des sols est évaluée dans le contexte de la comparaison des variantes optimales (Figure 3.29). L'augmentation des dommages causée par l'usage direct des sols est identique pour toute les variantes ce qui ne modifie pas le classement entre variantes. Toutefois les écarts entre les variantes sont réduits sur les indicateurs d'occupation des sols et de dommages aux écosystèmes. Une maison en ossature bois se trouve donc moins « pénalisée » sur cet indicateur dans une comparaison avec des maisons en béton. Surtout, ne pas prendre en compte l'usage direct des sols sous estime de manière significative (de 32 à 44 %) les dommages potentiellement causés aux écosystèmes par la construction de maisons individuelles. Cette hypothèse n'induit pas de changement dans les résultats obtenus précédemment. Elle n'affecte pas non plus les prochains résultats qui sont principalement basés sur l'évaluation de l'indicateur d'effet de serre.

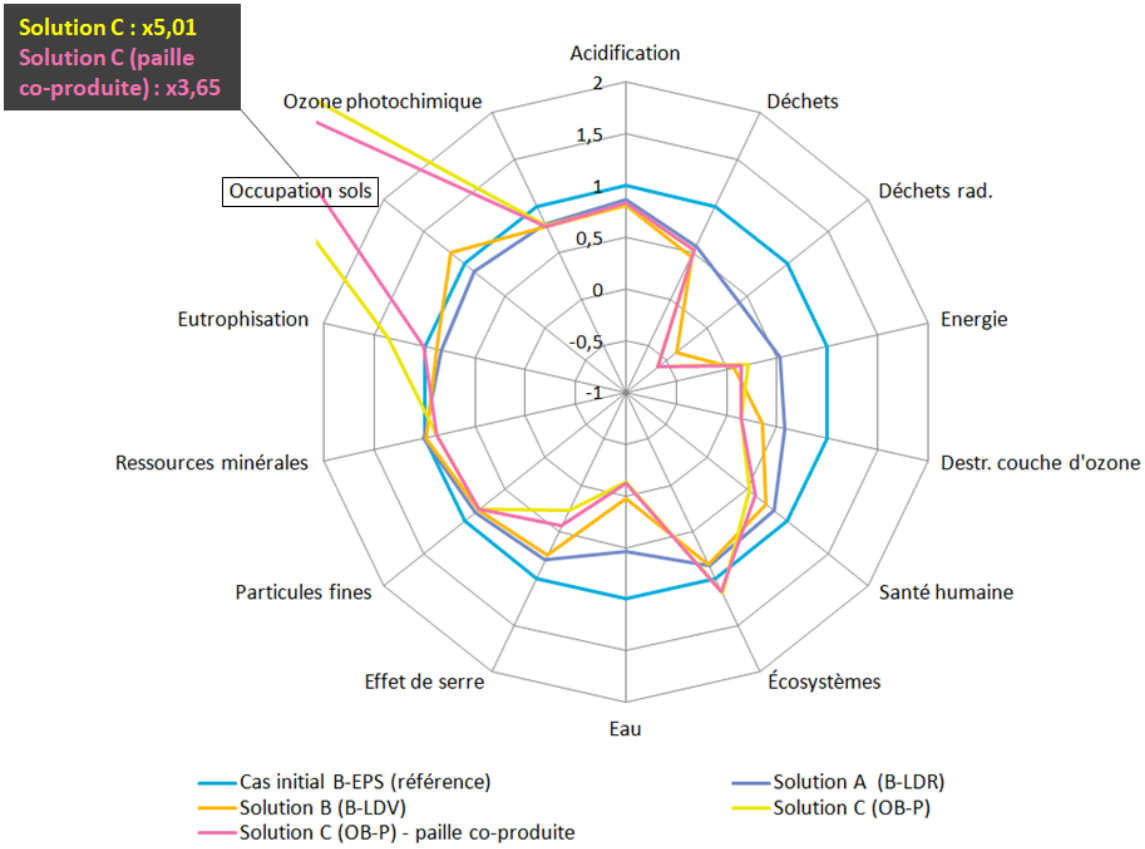


Figure 3.29 – Comparaison de variantes avec prise en compte de l'usage direct des sols

3.3 Influence de la contrainte zéro-énergie primaire

3.3.1 Présentation du problème

La consommation d'énergie primaire est un indicateur le plus souvent utilisé pour déterminer la performance énergétique d'un bâtiment car il permet de considérer l'utilisation de tous les vecteurs énergétiques : électricité, gaz, fioul, biomasse. Toutefois, les coefficients d'énergie primaire réglementaires standards ne sont pas définis de manière suffisamment objective pour pouvoir être utilisés dans une ACV et en optimisation multicritère. Un biais dans ces coefficients peut favoriser ou défavoriser un type d'énergie par rapport à un autre sur des critères autres que seulement environnementaux. Des coefficients d'énergie primaire qui proviennent de méthodes de caractérisation en ACV peuvent être utilisés comme ceux de la méthode *Cumulative Energy Demand* ou « *CED »* (Hischier et al., 2010). D'autre part, l'emploi de coefficients dynamiques permet d'établir un bilan d'énergie primaire plus représentatif de la réalité et des fluctuations saisonnière du mix de production d'énergie.

3.3.2 Caractéristiques du coefficient d'énergie primaire du mix électrique

Les coefficients horaires de l'énergie primaire d'un kWh d'électricité du mix électrique des années simulées 2016 et 2020 sont visualisés avec des boîtes à moustaches à la Figure 3.30. Leur valeur médiane est respectivement de 3,71 et 3,55 $kWhE_p/kWhE_f$. Avec un écart-type qui représente seulement 3,3 % et 4,2 % de la valeur médiane, l'amplitude moyenne de la variabilité temporelle reste relativement faible.

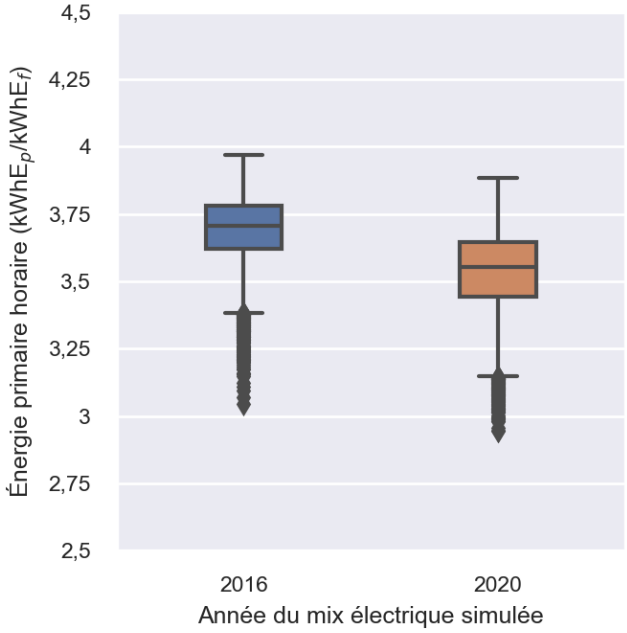


Figure 3.30 – Boîte à moustaches des coefficients horaire d'énergie primaire d'un kWh d'électricité de mix électriques simulés pour les années 2016 et 2020

La consommation d'énergie primaire des différentes technologies de production du mix électrique par kWh d'électricité générée est indiquée à la Figure 3.31. Les technologies de production d'électricité fossiles, de pointe et nucléaire sont celles qui ont les plus fortes intensités en énergie primaire par kWh d'électricité produite, de 2,8 $kWhE_p/kWhE_f$ pour la cogénération gaz à 4,4 $kWhE_p/kWhE_f$ pour la cogénération au fioul. Le nucléaire, qui a une place essentielle dans le mix électrique (entre 70 et 80 % durant l'année), a donc contribution très importante dans l'impact en énergie primaire du kWh d'électricité du réseau, avec son intensité d'énergie primaire de 4,3 $kWhE_p/kWhE_f$.

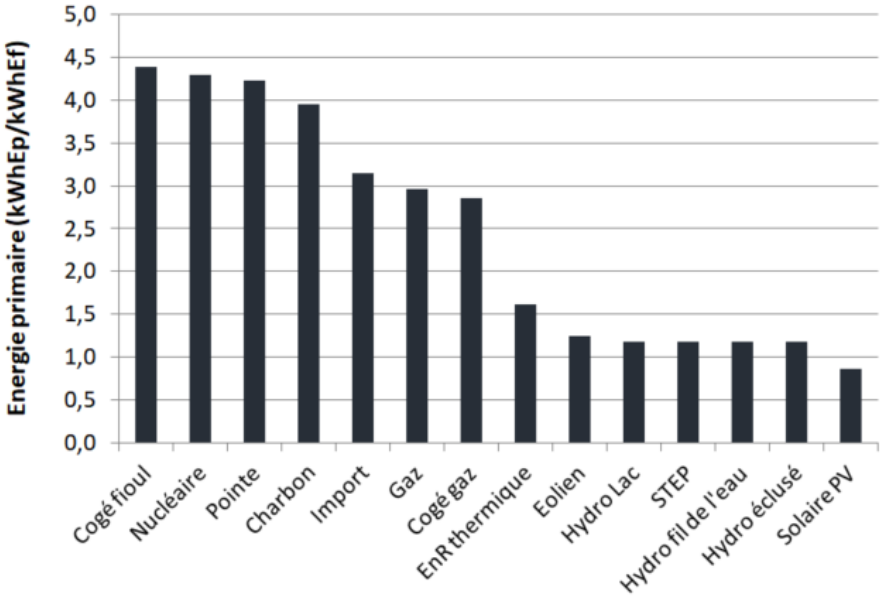


Figure 3.31 – Contenu en énergie primaire d'un kWh d'électricité produit par différentes technologies d'après ecoinvent 3.4 et *CED* (Hischier et al., 2010)

La variabilité temporelle du coefficient d'énergie primaire d'un kWh d'électricité est à la fois saisonnière et journalière (Figure 3.32). À l'échelle de l'année, le coefficient d'énergie primaire est en moyenne le plus faible au mois de Mai et au mois de Juin. Les mois d'août à février présentent les moyennes mensuelles. En été, elles sont liées à la forte part de production nucléaire en dehors des heures de fort ensoleillement. En hiver elles sont renforcées par les pointes hivernales qui comprennent une part importante d'énergies fossiles. À plus petite échelle, le coefficient d'énergie primaire présente une périodicité journalière tout au long de l'année, avec un niveau le plus bas vers 13h et des pics de la fin de soirée jusqu'à 4h du matin.

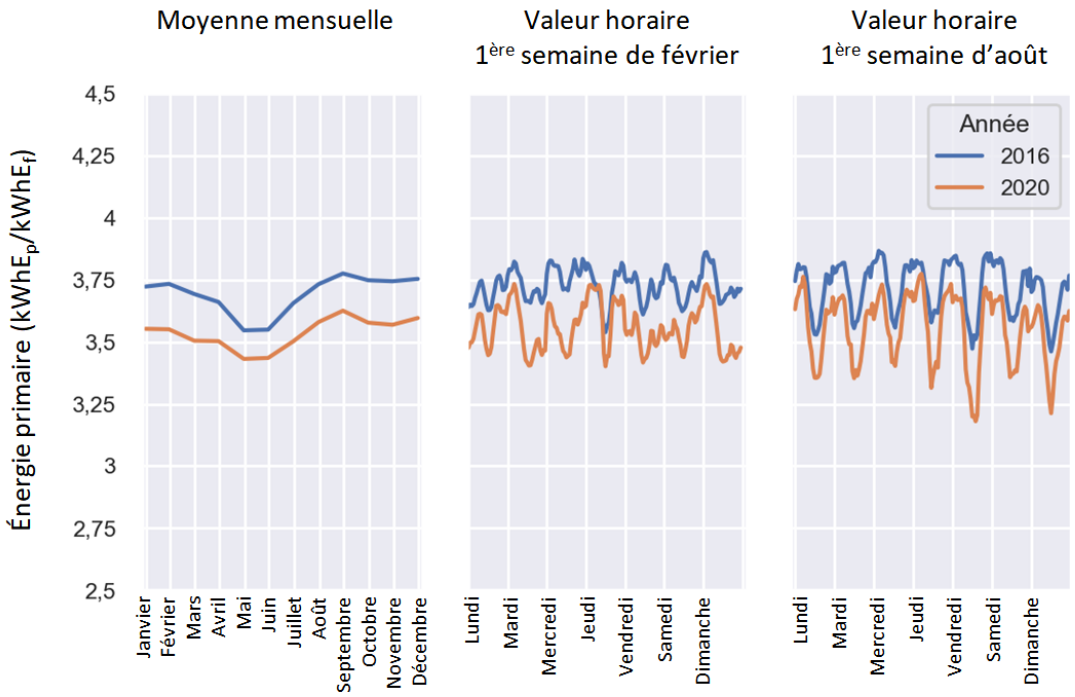


Figure 3.32 – Variabilité mensuelle et journalière du coefficient d'énergie primaire

Dans un analyse à l'échelle infra-journalière, indiquée à la Figure 3.33, la production nucléaire présente une oscillation de sa part dans le mix qui varie de 70 % vers 12h jusqu'à 80 % pendant la nuit. Cette variation combinée à celle de la production PV qui atteint un pic autour de 14h est corrélée à la variabilité infra journalière du coefficient d'énergie primaire. À l'échelle annuelle, les technologies fossiles et de pointes vont influencer le coefficient d'énergie primaire avec une production durant les mois d'hiver. Les mix peuvent dépasser 100 % des pertes de 15 % sont comptées dans l'énergie stockée ce qui augmente la quantité d'électricité consommée issue du turbinage.

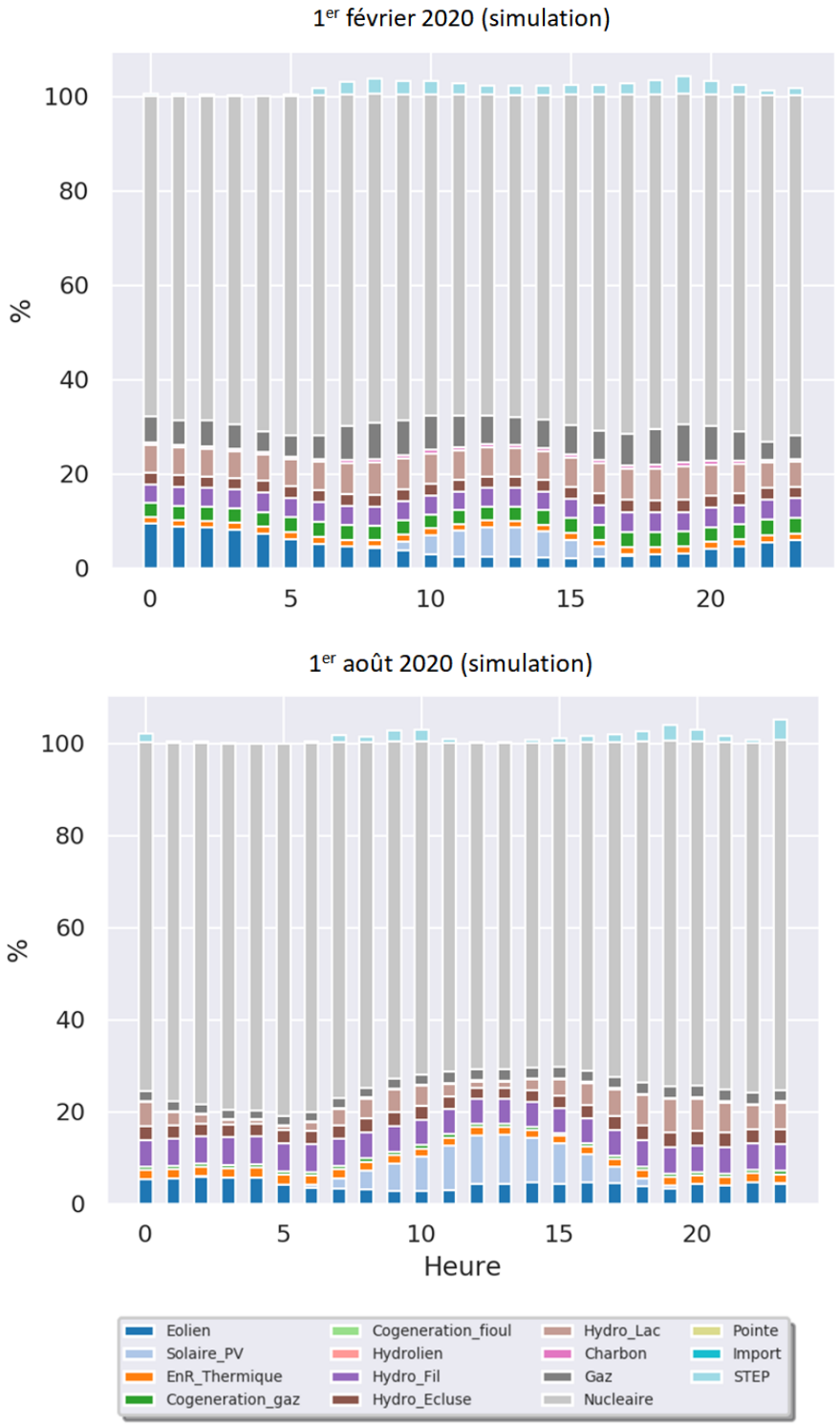


Figure 3.33 – Composition du mix électrique infra-journalier le 1er février et le 1er août de l'année 2020 simulée

3.3.3 Analyse des résultats

Dans cette partie, le problème d'optimisation précédent (POM Complet) est calculé en remplaçant la contrainte sur le bilan d'énergie final par une contrainte sur le bilan d'énergie primaire. Des coefficients dynamiques sont employés pour calculer l'énergie primaire de l'électricité à partir des données horaires du mix électrique et de la méthode de caractérisation de l'énergie primaire *CED* utilisée dans les calculs d'ACV décrits jusqu'à présent. Les caractéristiques du problème d'optimisation sont données dans le Tableau 3.16.

Tableau 3.16 – Caractéristiques du problème d'optimisation complet

Nom du problème	POM Complet - énergie primaire		
Nb. individus	200	Taux de croisement	0,9
Nb. générations	40	Taux de mutation	0,15
Échantillonnage	Sobol	Espace de décision	Complet
Fonctions objectif	$\begin{cases}\min f_1(x) = GES_{tot}\,(x) \\ \min f_2(x) = C_{const}\,(x)\end{cases}$	Contrainte	$E_{\text{primaire}}(x) > 0$

L'évolution de l'hypervolume des POM basés sur les bilans d'énergie finale (Ef) et d'énergie primaire (Ep) sont comparés à la Figure 3.34. Le POM basé sur le bilan d'Ep converge presque vers un front de même qualité en termes de valeurs de fonctions objectif que le POM avec bilan d'Ef avec une différence entre les hypervolumes finaux de 1,3 % peu significative.

Le front issu du bilan d'énergie primaire comprend 80 solutions qui sont réparties sur 3 fronts optimums locaux comme dans le problème précédent. La différence de qualité de convergence entre les deux fronts se situe principalement sur les zones d'optimum local 2 et 3 (Figure 3.35). Sur ces zones, les solutions les moins coûteuses du POM E_p sont dominées par les solutions les moins coûteuses du POM E_f.

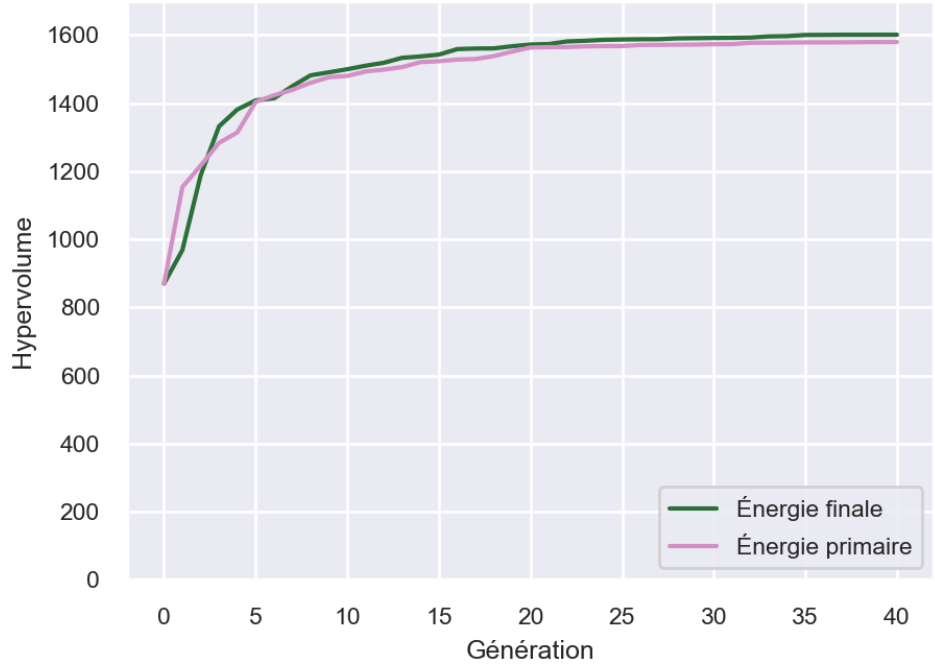


Figure 3.34 – Évolution de l'hypervolume des fronts des POM basés sur la contrainte du bilan d'énergie finale et du bilan d'énergie primaire

Figure 3.35 – Comparaison des fronts locaux des POM avec bilan Ef et bilan Ep

La répartition des besoins de chauffage, de la production PV et du bilan d'énergie finale des solutions de ces zones en fonction de leur coût est donnée à la Figure 3.37 pour la zone 2 et à la Figure 3.37 pour la zone 3. La différence principale entre ces deux POM réside dans les solutions les moins coûteuses. Elles sont un peu plus chères dans le cas du POM E_p (décalage des solutions vers la droite) et ces premières solutions possèdent une plus grande production d'électricité PV autour de +8 %. Cela peut s'expliquer par l'export d'électricité PV sur le réseau qui a un bénéfice moins important dans un bilan d'énergie primaire que dans un bilan d'énergie finale. Une conséquence est la nécessité d'installer une plus grande surface de panneaux solaires PV afin de satisfaire la contrainte zéro-énergie. Toutefois, l'influence du bilan d'énergie utilisé dans la contrainte zéro-énergie reste marginale sur ce POM.

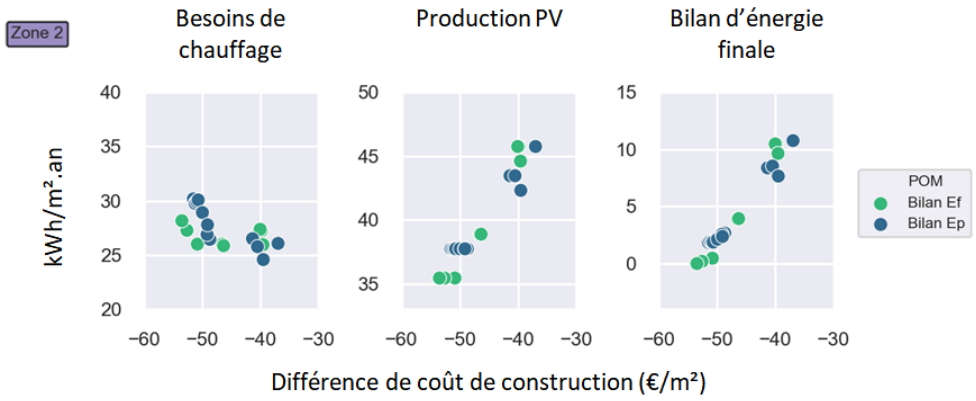


Figure 3.36 – Comparaisons de la zone 2 des POM avec bilan Ef et avec bilan Ep

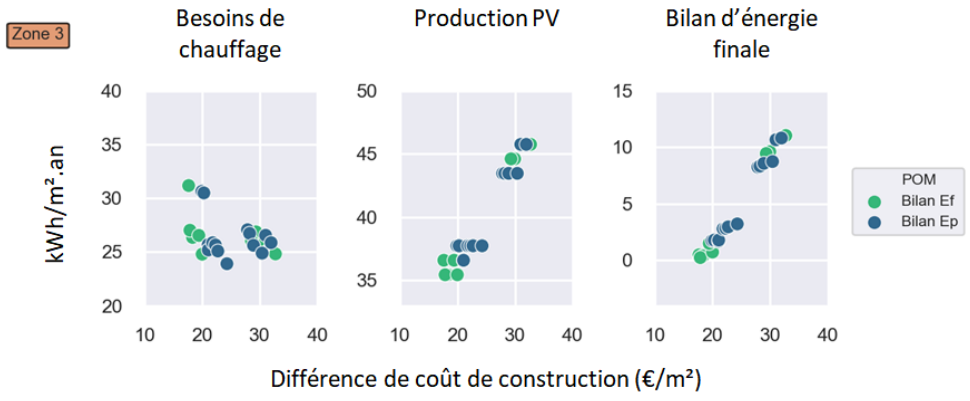


Figure 3.37 – Comparaisons de la zone 3 des POM avec bilan Ef et avec bilan Ep

Du point de vue de l'étape d'utilisation d'un bâtiment, la production domestique d'électricité PV qui se produit plutôt à autour de 13h/14h et principalement en été, est directement défavorisée dans un bilan zéro-énergie basé sur des coefficients d'énergie primaire dynamiques. Les résultats de l'optimisation multicritère ont toutefois montré un impact limité de ce phénomène dans le choix des variables de conceptions optimales à cause du faible intervalle de variation du coefficient d'énergie primaire liée à prépondérance d'un « bandeau » de production d'origine nucléaire de forte intensité en énergie primaire. Par ailleurs, le profil de consommation d'énergie du bâtiment joue un rôle dans le bilan dynamique avec une plus faible consommation durant les heures creuses pendant lesquelles les coefficients d'énergie primaires sont élevés à cause de la prépondérance de la production d'électricité nucléaire. Dans un bâtiment domestique, la consommation d'énergie est généralement la plus faible durant ces heures nocturnes, ce qui réduit l'influence du pic du coefficient d'énergie primaire dans le bilan zéro-énergie du bâtiment.

Conclusion du chapitre 3

Ce chapitre a été l'occasion d'appliquer la procédure d'optimisation multicritère au cas d'étude présenté dans le chapitre 2 et de tester plusieurs variantes de ce problème d'optimisation. Le premier problème d'optimisation multicritère a été défini sur un espace de décision relativement simple qui ne comportait pas de variation du système constructif. Son front de Pareto global a pu être identifié par l'algorithme en moins de 20 générations sur les 40 initialement définies pour le critère d'arrêt. L'analyse de ses solutions optimales a mis en avant une stratégie de conception basée essentiellement sur : 1) la réduction des impacts de l'étape de construction associés à l'enveloppe lourde du cas d'étude, 2) l'installation d'une large surface de panneaux solaire PV pour répondre à la contrainte zéro-énergie/BEPOS et améliorer le bilan d'émission de GES sur l'étape d'utilisation grâce à de l'export sur le réseau.

L'espace de décision a ensuite été enrichi avec l'ajout de choix de conception en termes de matériaux d'isolation et de système constructif. L'interfaçage entre l'algorithme d'optimisation et les moteurs de calcul de SED et d'ACV a été adapté pour s'assurer que

l'espace de décision ne détériore pas la capacité de convergence de l'algorithme. La complexification de l'espace de décision a eu pour conséquence une convergence de l'hypervolume plus tardive que dans le cas « simple » après 35 générations. Cette convergence n'a toutefois pas été affectée par la méthode d'échantillonnage de la population initiale et très faiblement par la prise en compte d'un bilan zéro-énergie primaire.

L'exploration d'un espace de décision plus complexe a permis d'identifier un front de Pareto global qui couvre plus largement l'espace des objectifs proposant ainsi une plus grande diversité de solutions pouvant répondre aux préférences d'un décideur. L'analyse des résultats a montré deux tendances distinctes dans le front global au regard des objectifs :

- une tendance où le coût de construction a une relation non linéaire avec l'émission de GES des solutions. Les premiers investissements diminuent fortement l'émission de GES puis les suivants ont moins d'influence sur ce critère. Cette tendance se traduit dans la conception par une réduction en priorité des besoins de chauffage. Elle reflète un faible niveau de convergence dans cette portion de l'espace des objectifs.
- une tendance où l'investissement supplémentaire diminue très faiblement les émissions de GES. Les besoins de chauffage sont stables parmi ces solutions et l'investissement supplémentaire est utilisé pour agrandir l'installation solaire PV.

L'optimisation multicritère a prouvé toute son efficacité dans l'identification d'équilibres optimaux dans un contexte de relations et de compromis complexes entre les différents paramètres de conception et les objectifs. Une analyse doit être menée *a posteriori* par le concepteur pour interpréter ces équilibres et comprendre leur logique dans le but de garantir la robustesse des résultats d'optimisation. Celle-ci requiert d'avoir une bonne connaissance préalable des spécificités du cas d'étude, des données et des hypothèses utilisées. L'optimisation multicritère a également montré son utilité dans l'identification de mauvais choix de conception initiaux comme par exemple le cas du vitrage Ouest mal exposé ou l'isolation de zones non-chauffées. Les corrections qui peuvent être apportées par l'algorithme sont limitées par l'espace de décision, en

l'occurrence une modification des caractéristiques morphologiques du bâti permettrait d'identifier des solutions techniques plus pertinentes pour résoudre ces défauts.

Une méthode simple et interactive d'aide à la décision multicritère basée sur la visualisation de coordonnées parallèles a été illustrée. Des solutions ont été choisies en lien avec des exemples de préférences exprimées par des décideurs. Les résultats en ACV montrent que l'optimisation sur l'objectif de réduction des émissions de GES abouti à une réduction globale des impacts sur une majorité des indicateurs environnementaux sélectionnés. Néanmoins, l'usage de matériaux biosourcés uniquement motivé par le critère d'effet de serre peut aboutir à un déplacement des impacts vers l'occupation des sols et engendrer des dommages aux écosystèmes plus élevés au niveau *endpoint.*

Des incertitudes sur les données d'origine de la paille et sur la prise en compte de l'usage direct des sols du bâtiment ont été testées. L'usage direct des sols se trouve être particulièrement contributeur dans les dommages aux écosystèmes dans le cas d'une maison. Sa prise en compte les écarts d'impacts entre les variantes en béton et à ossature sur cet indicateur.

Enfin, la contrainte zéro-énergie primaire n'a pas montré d'influence significative sur les résultats de l'optimisation.

4 MÉTHODE PROSPECTIVE D'ACV DYNAMIQUE DU BÂTIMENT

Ce chapitre aborde le développement d'une méthode prospective en ACV de bâtiment qui est basée sur l'exploration de cycles de vie prospectifs du bâtiment. La méthode est conçue avec l'objectif d'évaluer la robustesse d'une conception de bâtiment sur un maximum de scénarios de cycles de vie possibles tout en minimisant le coût calculatoire de cette évaluation en vue de son intégration dans la boucle générationnelle de l'optimisation multicritère robuste. Des scénarios prospectifs sont construits autour de quatre paramètres évolutifs influents en ACV de bâtiment zéro-énergie : le climat, le mix électrique, le vieillissement du système solaire PV et l'installation d'une climatisation par les occupants. Ces scénarios prospectifs sont traités et assemblés pour former 32 trajectoires alternatives de cycle de vie du bâtiment.

4.1 Fondements de la méthode

4.1.1 Contexte de l'écoconception robuste

L'état de l'art du Chapitre 1 a mis en évidence les nombreuses sources d'incertitudes en ACV de bâtiment qui peuvent être distinguées par leur position dans la démarche d'ACV : les choix et les hypothèses, la construction de l'inventaire de cycle de vie (IVC), la caractérisation des impacts et l'étape d'interprétation des résultats. Les incertitudes dans la construction de l'ICV sont celles couramment rencontrées dans la pratique ACV (p. ex. la qualité de la base de données d'inventaire utilisée) et celles plus spécifiques au cycle de vie du système d'étude.

Le bâtiment est un système complexe du point de vue de l'analyse de cycle de vie (Cluzel et al., 2014). Il entretient de nombreuses interactions dynamiques avec d'autres systèmes complexes (l'environnement et la technosphère) et ses composants possèdent leur propre cycle de vie (matériaux de construction, CVC, PV). Il est également soumis à toutes sortes de décisions humaines (occupants, bailleurs, réglementation locale et nationale). Cette complexité en fait un « système ouvert » d'après la définition donnée par Oreskes et al. (1994) pour caractériser l'usage de modèles en sciences de l'environnement : il n'est pas possible de mesurer une issue réelle (l'émission de GES du cycle de vie du bâtiment) puis de la comparer avec les résultats du modèle pour estimer sa fiabilité. Une forte incertitude épistémique entoure ainsi l'étude des systèmes ouverts.

L'écoconception est caractérisée par un contexte prospectif, puisque le produit étudié est encore inexistant, qui apporte une seconde dimension à l'incertitude épistémique qui est celle de l'ignorance sur le futur cycle de vie. Le cycle de vie du bâtiment comporte une part extrêmement importante d'incertitude épistémique prospective pour deux raisons : sa complexité mentionnée ci-avant oblige à considérer les évolutions futures des autres systèmes en interaction, et sa très longue durée de vie rallonge l'horizon de l'ignorance envers le futur. La modélisation du cycle de vie d'un bâtiment en vue d'une aide à l'écoconception correspond ainsi au cas « D » de la Figure 4.1 où la présence d'incertitude épistémique est la plus forte.

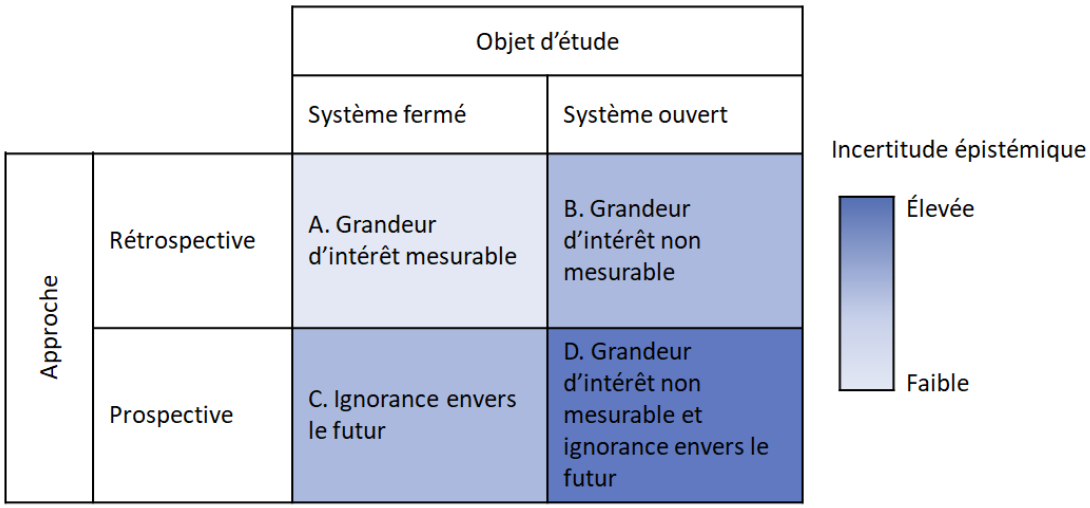


Figure 4.1 – Cas d'incertitude épistémique rencontrés en modélisation

À notre connaissance, aucune des méthodes actuelles en écoconception de bâtiment ne prend en compte ces deux dimensions de l'incertitude épistémique dans une modélisation et une aide à la décision cohérente. La pratique courante de l'ACV de bâtiment repose sur l'évaluation d'un unique « cycle de vie » dont l'étape d'utilisation est construite sur la base des consommations d'énergie d'une seule année type calculée à partir de données actuelles ou historiques pour la plupart (p. ex. les données climatiques, ou les caractéristiques techniques des composants qui ne se dégradent pas avec le temps). Les étapes de rénovation et de fin de vie qui se déroulent au moins 10 ou 20 ans après la construction sont généralement calculées en considérant des technologies statiques (p.ex. les mêmes procédés de fabrication et de fin de vie). Cette approche conservatrice est contradictoire avec l'objectif généralement mentionné dans l'étape n°1 de l'ACV (la définition des objectifs et du champ de l'étude) : « d'évaluer les impacts environnementaux du bâtiment sur sa durée de vie complète ». D'après les recommandations de l'ILCD (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010), l'usage de données seulement historiques ou actuelles offrent un horizon temporel de validité des résultats de l'ACV de 5 ans, qui est très courte comparée à la durée de vie d'un bâtiment. Dans la pratique de l'ACV de bâtiment, il serait ainsi préférable, soit de mentionner une durée d'étude plus en phase avec l'approche utilisée, soit d'expliciter clairement ses limites de validité.

Plusieurs points de vue antagonistes ont été identifiés dans les différents champs de recherche s'intéressant à la problématique de l'incertitude épistémique et prospective. Dans les travaux fondateurs de Pesonen et al. (2000) en ACV prospective, les auteurs recommandent d'utiliser un maximum de 3 à 4 scénarios de cycle de vie prospectifs pour faciliter l'aide à la décision. Cette approche est celle employée par exemple par Cluzel et al. (2014) dans leur étude de la phase d'exploitation d'un système industriel. À l'inverse, dans le domaine de l'aide à la décision sous incertitudes profondes, il est recommandé d'employer un maximum de scénarios afin de couvrir le plus largement possible l'espace des futurs plausibles d'une décision, dans le but de fournir au décideur toutes les informations utiles pouvant éclairer une décision robuste (Hamarat et al., 2013 ; Guivarch et al., 2017 ; Kasprzyk et al., 2013 ; Weaver et al., 2013). Cette philosophie est également partagée par Plevin et al. (2014) dans le domaine de l'ACV conséquentielle, qui recommandent d'adopter une approche exploratoire de toutes les incertitudes qui peuvent exister sur la modélisation de systèmes complexes. De plus, Pesonen et al. (2000) considèrent que l'ACV prospective, qui décrit une trajectoire du présent vers le futur, et la modélisation d'une ACV dynamique ne sont pas équivalentes. Toutefois, en s'appuyant sur le cadre de définition de l'ACV dynamique de bâtiment proposée par Negishi et al. (2018), il semble impossible de dissocier ces deux approches en ACV de bâtiment puisque de nombreuses sources de variabilité temporelle vont-elles-mêmes évoluer dans le futur comme, par exemple, le comportement des occupants ou le mix électrique.

Le *think-tank The Shift Project* a réalisé un référentiel méthodologique pour les études prospectives sur la transition des systèmes énergétiques (Raillard, 2019). Plusieurs limites des études prospectives y sont mentionnées et des recommandations sont proposées pour contribuer à un cadre méthodologique commun dans la construction de scénarios prospectifs. Ces recommandations concernent entre autres :

- l'intégration des dernières connaissances scientifiques sur les limites physiques globales (p. ex. climatiques, environnementales, ressources) et en sciences sociales (p. ex. les modèles comportementaux, l'effet rebond, l'acceptation sociale) ;
- la transparence dans les données et les modèles utilisés ainsi que dans les acteurs et parties prenantes de l'étude ;

- l'identification des conditions aux limites du système en décrivant les systèmes d'arrière-plan et les interactions qui existent entre ces systèmes et le système principal ;
- la prise en compte d'évolutions dans les comportements de consommation énergétique des usagers.

4.1.2 Grandeurs d'intérêt robustes

Avant de sélectionner les paramètres incertains les plus influents, il est nécessaire de définir les grandeurs d'intérêt dont la robustesse sera évaluée pour aider la prise de décision robuste. Ces grandeurs d'intérêt sont définies en accord les problématiques qu'un décideur peut rencontrer en écoconception de bâtiment zéro-énergie. Il s'agit des grandeurs suivantes :

- **Le bilan zéro-énergie.** L'exigence du bilan zéro-énergie est t-elle respectée dans la plupart des scénarios possibles du cycle de vie d'un bâtiment zéro-énergie ? Quel est le risque (au sens d'une éventualité qui est redoutée et pas dans le sens statistique), qu'un bâtiment initialement zéro-énergie s'éloigne de ce bilan ? Plusieurs phénomènes peuvent participer à cet éloignement, par exemple les changements de consommation d'énergie induit par le réchauffement climatique, le comportement des occupants ou le vieillissement des composants et des équipements.
- **L'émissions de GES et plus globalement les impacts environnementaux sur le cycle de vie du bâtiment.** Les impacts et en particulier le taux d'émission de GES annuel peuvent-ils rester stables ou sont-ils sensibles à des incertitudes prospectives en lien avec les consommations du bâtiment et la composition du mix électrique ?
- **Le confort des occupants.** Quels sont les risques d'inconfort pour les occupants dans un contexte de réchauffement climatique où l'intensité et la fréquence des vagues de chaleur augmente ? L'installation d'une climatisation par les occupants peut-elle être évitée ?

D'autres grandeurs d'intérêt qui ne font pas partie du cadre de cette thèse pourraient être évaluées comme par exemple le coût du cycle de vie du bâtiment (*life cycle cost*) qui comprend les coûts d'utilisation et de rénovation (Rysanek et Choudhary, 2013).

4.1.3 Paramètres incertains sélectionnés

Les paramètres incertains les plus influents sur les grandeurs d'intérêt choisies doivent être sélectionnés. Ils peuvent être déterminés à partir de méthodes d'analyse de sensibilité qui vont évaluer l'influence relatives des paramètres sur l'incertitude d'une grandeur d'intérêt en sortie du modèle (Pannier et al., 2018). Dans cette thèse, la sélection des paramètres incertains est basée sur des éléments de la littérature et sur une estimation des coûts calculatoires. Quatre phénomènes incertains principaux sont retenus dans la suite et accompagnés d'une description de leur contribution au coût calculatoire de la méthode de propagation d'incertitude.

Le changement climatique. Le changement climatique a des conséquences sur l'élévation des températures, la fréquence et l'intensité de vagues de chaleur, les événements climatiques extrêmes comme les sécheresses et les inondations. Du point de vue de la modélisation en SED du bâtiment le principal paramètre concerné est l'augmentation de la température extérieure dont les conséquences attendues sont une diminution des besoins de chauffage en hiver, et une augmentation des besoins de rafraîchissement en été (Olonscheck et al., 2011 ; Farah et al., 2019). D'autres paramètres sont concernés par ces changements comme le rayonnement solaire, qui va affecter les apports bioclimatiques et la production d'électricité par les panneaux solaires PV, et l'humidité relative qui va affecter notamment les moisissures et la dégradation des systèmes CVC (de Wilde et Coley, 2012). Ces changements posent deux défis principaux en écoconception de bâtiment zéro-énergie : (1) minimiser l'émission de GES du bâtiment et sa contribution au changement climatique sans déplacement d'impact, (2) assurer la robustesse des performances énergétiques du bâtiment et la qualité du confort thermique qu'il fournit à ses occupants. Dans le cas du bâtiment zéro-énergie se pose la question de sa capacité à garder un bilan énergétique annuel nul en cas d'installation d'une climatisation par les occupants, une pratique qui tend à se répandre avec la hausse des

températures. Plusieurs études ont montré l'influence importante de la variabilité météorologique et de son évolution future dans les performances énergétiques du bâtiment (de Wilde et al., 2011 ; Hong et al., 2013 ; Nik, 2016) et ses impacts environnementaux (Pannier, 2017a). La propagation d'incertitudes sur les paramètres météorologiques représente une forte contribution potentielle aux temps de calculs puisqu'elle nécessite de réaliser plusieurs SED complètes du bâtiment.

Le comportement des occupants. Les occupants jouent un rôle très important dans les consommations énergétiques d'un bâtiment à cause de leurs choix concernant les températures de consignes, leurs consommations d'eau, d'électricité, l'ouverture des fenêtres et la ventilation. Ces comportements sont sources de variabilité et contribuent grandement à l'incertitude sur la consommation d'énergie du bâtiment (Hopfe et Hensen, 2011 ; Huang et al., 2018b ; Tian et al., 2018 ; Bucking et al., 2014). Il est probable que ces comportements changent à l'avenir avec l'avènement de nouveaux appareils domestiques qui peuvent réduire la consommation d'énergie par une meilleure efficacité ou l'augmenter par de nouveaux usages (p. ex. le rechargement d'une voiture électrique ou de plus en plus d'objets connectés). L'association négaWatt a construit des hypothèses sur les comportements futurs des occupants dans leur scénario prospectif 2017-2050 (Association négaWatt, 2018). La propagation d'incertitudes sur les paramètres d'occupation influence les besoins thermiques du bâtiment et requiert l'usage d'une SED complète coûteuse en temps de calcul. Pour cette raison, un seul aspect prospectif lié au comportement des occupants est pris en compte. L'installation d'une climatisation dans un bâtiment qui en est initialement dépourvu est une éventualité qui a de grandes chances de se produire à l'avenir en raison du réchauffement climatique. L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) estime qu'il y aura un doublement du nombre de systèmes de climatisation installés en Europe d'ici 2040 et qu'en 2050 deux tiers des logements dans le Monde en seront équipés, triplant ainsi la demande de climatisation actuelle [20]. L'installation d'une climatisation dans un bâtiment aura des conséquences sur sa consommation d'énergie et ses impacts environnementaux qui peuvent être atténuées si elle est anticipée dès la phase

[20] https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling

de conception avec, par exemple, une isolation, des ratios de surface vitrée et des casquettes adaptés (Kitous et Després, 2018). Cette éventualité est considérée dans la méthode d'ACV robuste étant donné la forte influence qu'elle peut avoir sur les trois grandeurs d'intérêts étudiées.

Le vieillissement des équipements. Le vieillissement des matériaux de construction et des équipements a pour conséquence une dégradation dans le temps de leurs caractéristiques thermiques et énergétiques (Waddicor et al., 2016 ; Eleftheriadis et Hamdy, 2018). Dans le cas spécifique du bâtiment zéro-énergie, le vieillissement et la dégradation de l'installation solaire PV peuvent réduire la production d'électricité au fil des années et conduire à un éloignement, voire à un non-respect, du niveau zéro-énergie initial (Huang et al., 2018b). Le vieillissement des panneaux solaires PV est le seul phénomène de vieillissement pris en compte dans cette étude pour le rôle majeur que joue la production d'électricité PV dans le bilan zéro-énergie. Par ailleurs, la prise en compte de cette évolution temporelle a un coût calculatoire négligeable puisqu'elle ne nécessite pas le calcul complet d'une SED de bâtiment.

L'évolution du mix électrique. La composition du mix électrique détermine l'impact environnemental de la consommation d'électricité. Son évolution future est liée au remplacement d'anciennes centrales, au développement croissant des énergies renouvelables et à l'abandon, en Europe, des énergies fossiles, voire du nucléaire. La description du mix électrique et sa composition est un aspect particulièrement influent en ACV de bâtiment (Herfray et Peuportier, 2012 ; C. Roux, Schalbart, Assoumou, et al., 2016 ; Pannier, 2017a ; Asdrubali et al., 2019 ; William O. Collinge et al., 2018). L'évaluation des impacts de l'électricité en ACV a un coût calculatoire négligeable. Plusieurs trajectoires d'évolution possibles peuvent donc être considérées.

4.1.4 Approche proposée

La méthode d'ACV prospective de bâtiment qui est développée en vue de son intégration dans une optimisation multicritère robuste, est construite autour de quatre critères principaux qui s'appuient sur les problématiques évoquées ci-avant et dans le Chapitre 1 :

- **La méthode doit reposer sur la modélisation dynamique et prospective du cycle de vie du bâtiment**. Des aspects dynamiques infra-annuels et inter-annuels sont pris en compte et combinés avec des scénarios prospectifs sur des paramètres incertains. L'ensemble permet de créer plusieurs trajectoires temporelles de cycle de vie dynamiques possibles du bâtiment.
- **Ces trajectoires concernent seulement la construction d'un ICV dynamique et prospectif**. Les incertitudes et les aspects dynamiques dans l'étape de caractérisation des impacts ne sont pas traités dans cette thèse. Toutefois l'intégration de facteurs de caractérisation dynamiques, comme dans les travaux de Negishi et al. (2019), pourrait améliorer la qualité de la démarche.
- **La propagation stochastique des incertitudes est écartée des travaux de cette thèse** car elle augmenterait les temps de calculs au-delà du raisonnable dans une optimisation multicritère robuste. L'approche déterministe par scénarios est employée pour cette raison.
- La méthode s'inscrit dans l'approche recommandée par Hamarat et al. (2013) qui est **d'évaluer un maximum de scénarios de cycle de vie possibles** pour améliorer la robustesse d'une décision. Les scénarios prospectifs utilisés sont ainsi de type exploratoires et ne concernent que des variables exogènes, le décideur n'a plus d'influence possible sur le bâtiment une fois construit. Un compromis doit être identifié dans la sélection des scénarios pour qu'ils permettent : de propager les incertitudes les plus influentes en ACV de bâtiment, de produire un maximum de trajectoires de cycle de vie du bâtiment et de limiter au maximum les temps de calcul supplémentaires.

L'approche d'ACV prospective du bâtiment qui est proposée est illustrée sous la forme du cadre méthodologique de l'ACV dynamique proposé par Collinge et al. (2013) à la Figure 4.2. Les aspects dynamiques inter-annuels et infra-annuels du cycle de vie de bâtiment sont modélisés au niveau de l'inventaire du cycle de vie.

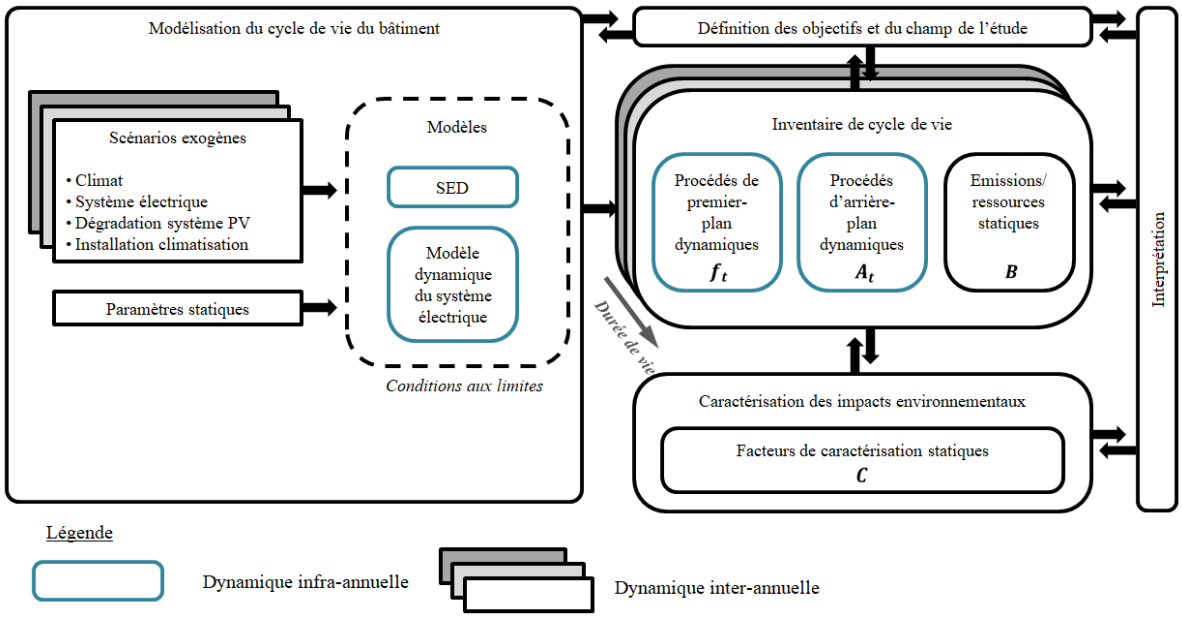


Figure 4.2 – Approche d'ACV prospective du bâtiment illustrée dans le cadre de l'ACV dynamique

4.2 Évolution du climat

4.2.1 Données climatiques en SED de bâtiment

La SED de bâtiment s'appuie généralement sur l'usage de données climatiques localement représentatives qui incluent une description horaire de la température extérieure, du rayonnement solaire global horizontal, du rayonnement solaire diffus, de l'humidité relative, de la vitesse et de la direction du vent. Les méthodes de génération de ces données météorologiques de référence les plus populaires sont les méthodes TMY (*Typical Meteorological Year*) et TRY (*Test Reference Year*) (Commission of the European Communities, 1985 ; Herrera et al., 2017). Ces deux méthodes appliquent la statistique de Finkelstein-Schafer (Finkelstein et Schafer, 1971) à des données climatiques historiques afin d'en extraire les mois réels les plus représentatif de l'ensemble de la période pour construire une année de référence. La représentativité statistique est évaluée à partir des distributions de probabilité cumulative sur un ensemble de variables climatiques qui contiennent généralement la température extérieure, le rayonnement global et la vitesse

du vent (Bravo Dias et al., 2020). Les données climatiques TMY/TRY répondent à plusieurs exigences :

- **Une périodicité réelle.** Les valeurs des variables climatiques sont le plus proche possible des moyennes réelles observées sur une période d'au moins 9 ans.
- **Une corrélation réelle entre les variables**. Les valeurs de température, de rayonnement, d'humidité, de couverture nuageuse, etc. forment une situation météorologique cohérente.
- **Une suite réelle**. Les situations météorologiques doivent avoir une variabilité représentative et réaliste.

Ce type de données climatiques de référence présente toutefois la limite de ne pas être capable de représenter de situation climatique extrême et de ne pas avoir de cohérence climatique à l'échelle annuelle (Nik, 2016).

Des fichiers météorologiques types ont été développés dans le cadre de la réglementation thermique française de 2012 (RT2012) pour différentes zones climatiques françaises à partir de données d'observations de 1994 à 2008 (Figure 4.3). Ils sont construits selon la norme NF-EN-ISO 15927-4 (International Organization for Standardization, 2005) qui impose la construction des données de référence à partir de données météorologiques historiques sur une période d'au moins 10 ans.

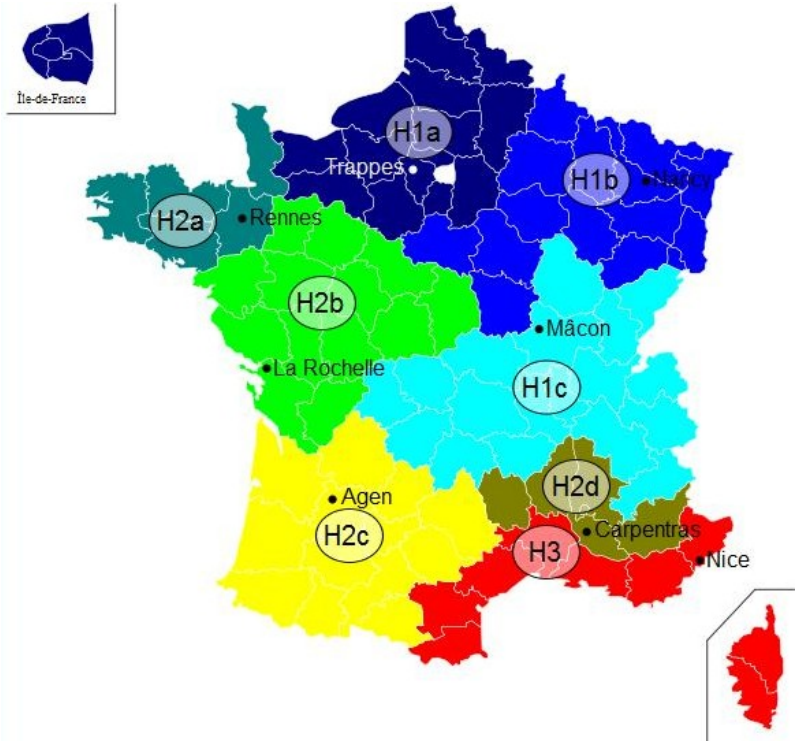


Figure 4.3 – Zones climatiques dans la réglementation thermique 2012 (RT2012)

4.2.2 Données climatiques futures

Le programme de recherche CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project*) coordonné par le GIEC a rassemblé des équipes de chercheurs en modélisation climatique au niveau international pour étudier le changement climatiques et ses évolutions futures possibles (Taylor et al., 2012). Ces travaux ont mené à l'élaboration de scénarios de référence sur l'évolution du forçage radiatif appelés RCP (*Representative Concentration Pathways*) (van Vuuren et al., 2011) cohérents avec l'état des connaissances scientifiques actuelles. Les conséquences de ces trajectoires sur les températures globales ont été évaluées avec des modèles de circulation générale du climat (*General Circulation Model, GCM*). En parallèle, les scénarios prospectifs technologiques, socio-économiques et réglementaires les plus cohérents avec ces évolutions ont été identifiés grâce à la modélisation intégrée énergie-climat (*Integrated Assessment Models, IAM*). Il résulte de ces travaux, quatre scénarios de référence qui sont présentés dans le 5ème rapport du GIEC (IPCC, 2014) et nommés d'après le niveau de forçage radiatif qu'ils atteignent en 2100 (en

$W.m^{-2}$) : RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5. Leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau 4.1. Le scénario RCP 2.6 est le plus optimiste et correspond à une trajectoire où de fortes politiques de réduction des émissions sont menées pour limiter le réchauffement planétaire à 2 °C. Le scénario RCP 8.5 est le plus pessimiste, il est basé sur l'hypothèse d'une croissance économique rapide, d'une forte évolution démographique avec l'usage de nouvelles technologies énergétiquement efficaces mais un recours toujours important aux énergies fossiles. Le scénario RCP 6.0 se différencie du scénario RCP 8.5 par une évolution démographique moins forte et un usage moindre des énergies fossiles. Il aboutit à une stabilisation du forçage radiatif après 2100. Le scénario RCP 4.5 est un scénario relativement optimiste, avec la même hypothèse démographique que le RCP 6.0, une évolution vers une économie de service et des technologies énergétiquement efficaces, mais sans initiatives particulières pour réduire les émissions de GES. Les trajectoires climatiques correspondantes ont été calculées par inter-comparaison de modèles de circulation générale du climat qui ont permis d'estimer des élévations moyennes de la température globale (Figure 4.4).

Tableau 4.1 - Vue d'ensemble des scénarios RCP (Moss et al., 2010)

Scenario	Forçage radiatif	Concentration de CO_{2eq} en 2100 (p.p.m.)
RCP 8.5	Augmentation continue >8,5 W/m² en 2100	>1370 CO_{2eq}
RCP 6.0	~6 W/m² stabilisation en 2100	~850 CO_{2eq} stabilisé
RCP 4.5	~4,5 W/m² stabilisation en 2100	~650 CO_{2eq} stabilisé
RCP 2.6	~3 W/m² en 2050 puis ~2,6 W/m² en 2100	~400 CO_{2eq} stabilisé

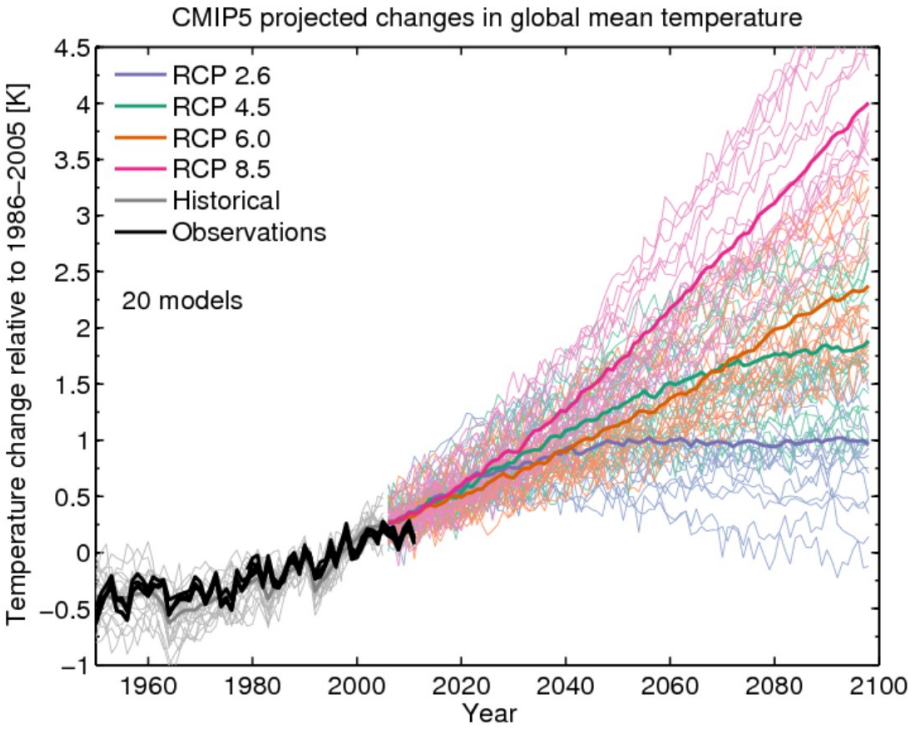


Figure 4.4 – Projection des scénarios RCP sur la différence de température globale avec la période 1986-2005 (source : Ed Hawkins)

Les modèles climatiques généraux produisent des données climatiques avec une résolution spatiale de 100 à 300 km qui est trop élevée pour être utilisée en SED du bâtiment. Des modèles climatiques régionaux (*Regionalised Climate Model, RCM*) permettent de réduire l'échelle spatiale de ces données de l'ordre de 12 à 60 km. Le site gouvernemental de la Drias (Donner accès aux scénarios *climatiques* Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement) fournit gratuitement des données issues de travaux de Météo-France avec le modèle Aladin ou de travaux de l'IPSL-CNRS avec le modèle WRF, pour n'importe quelle localisation en France métropolitaine. Toutefois, ces données décrivent les variables météorologiques avec une résolution journalière qui est trop grossière pour l'usage en SED du bâtiment, ils ont donc été adaptés à la résolution horaire.

4.2.3 Méthode de morphing

Une méthode particulièrement populaire pour réduire l'échelle temporelle de données météorologiques est le *morphing* dont le principe est de « déformer » un fichier météorologique horaire de référence afin de l'ajuster à des données climatiques futures (Belcher et al., 2005 ; Herrera et al., 2017 ; Bravo Dias et al., 2020). La procédure de *morphing* consiste à appliquer des opérations de « déplacement » et « d'étirement » sur les valeurs horaires de chaque variable d'un fichier météorologique de référence TMY ou TRY, à partir des valeurs mensuelles futures de ces variables. Une translation est appliquée à une variable lorsque des changements absolus sont attendus :

$$x = x_0 + \Delta x_m \quad \textbf{(4.1)}$$

avec x la variable climatique transformée, x_0 la variable climatique actuelle et Δx_m le changement absolu de la moyenne mensuelle pour le mois m.

Une homothétie est appliquée à une variable lorsque des changements relatifs sont attendus :

$$x = x_0 * \alpha_m \quad \textbf{(4.2)}$$

avec α_m le changement relatif de la moyenne mensuelle.

Un décalage et un étirement sont appliqués pour des changements absolus et relatifs :

$$x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m * (x_0 - \langle x_0 \rangle_m) \quad \textbf{(4.3)}$$

avec $\langle x_0 \rangle_m$ la moyenne mensuelle de la variable climatique dans la période actuelle.

Le principal avantage de la méthode de *morphing* est sa simplicité de mise en œuvre et son adaptabilité à tout fichier météorologique TMY. En revanche, la méthode est limitée par l'application d'une variation de la moyenne mensuelle qui ne permet pas de modifier le nombre de jours de températures extrêmes qui peuvent caractériser la fréquence et la durée des vagues de chaleur. Cette méthode a été utilisée par Roux et al. (2016) en ACV prospective du bâtiment qui considèrent un fichier météorologique de court et moyen-terme (de 2021 à 2050), et deux fichiers météorologiques de long-terme (de 2041 à 2070)

pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Toutefois, ils n'appliquent la méthode de *morphing* qu'à la variable climatique de la température extérieure.

4.2.4 Implémentation

La méthode est implémentée dans l'objectif de transformer les fichiers météorologiques de la RT2012 pour correspondre aux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Les données météorologiques futures proviennent du modèle climatique régionalisé Aladin de Météo France (ALADIN international team, 1997) et sont disponibles sur le site de la DRIAS[21]. Pour une localisation et une période donnée, l'utilisateur peut obtenir les variables journalières suivantes :

- la température maximale journalière et la température minimale journalière ;
- le rayonnement visible incident à la surface ;
- l'humidité spécifique.

Température moyenne et humidité relative

Les données sont d'abord préparées afin d'y ajouter deux variables climatiques indispensables : la température moyenne journalière et l'humidité relative pour le calcul des consommations d'énergie liées à la climatisation. Une relation empirique entre la température maximale et la température moyenne journalière est estimée à partir de données climatique issues du modèle de réanalyse climatique Merra 2 disponible *via* le service NASA Power[22] (Gelaro et al., 2017). Les modèles de réanalyse climatique fournissent des données climatiques pseudo-historiques pour toute période et localisation dans le Monde. Ils combinent l'usage d'un modèle de prévision climatique avec un ensemble massif de données d'observations historiques. Des données sont générées pour la période 1982-2018 sur lesquelles est appliquée la statistique de Finkelstein-Schafer pour créer une année météorologique de référence. À partir de cette année météorologique de

[21] http://www.drias-climat.fr/

[22] https://power.larc.nasa.gov/

référence un ratio empirique est calculé qui traduit la relation entre la température minimale, la température maximale et la température moyenne chaque jour de l'année type :

$$\alpha_j = 1 - (T_j^{passé-max} - T_j^{passé-moy})/(T_j^{passé-max} - T_j^{passé-min}) \quad \textbf{(4.4)}$$

avec α_j le ratio empirique des températures, $T_j^{passé-max}$ la température maximale (°C), $T_j^{passé-moy}$ la température moyenne, $T_j^{passé-min}$ la température minimale et j le jour de l'année.

Ce ratio représente le rapport entre, l'écart entre la température maximale et la température moyenne, et l'amplitude totale de température sur la journée. Il permet ensuite de calculer la température moyenne journalière des données futures d'Aladin tel que :

$$T_j^{moy} = \alpha_j\left(T_j^{\max} - T_j^{min}\right) + T_j^{min} \quad \textbf{(4.5)}$$

avec T_j^{moy} la température journalière moyenne future, $T_j^{\max}$ la température journalière maximale future et T_j^{min} la température journalière minimale future.

La série temporelle de la valeur du ratio α durant l'année de référence est visible sur la Figure 4.5. Elle montre une tendance saisonnière renforcée durant l'été où la température moyenne journalière sera plus proche de la température maximale et que de la température minimale. En hiver, la tendance est inverse, bien que moins marquée, avec le ratio $\alpha < 0{,}5$ qui signifie que la température moyenne journalière est plus proche de la minimale. Cette approche approximative permet d'estimer la température moyenne en reproduisant une certaine saisonnalité qui peut exister dans l'amplitude journalière de température. Elle est toutefois purement statistique et mathématique et n'assure pas de cohérence climatologique.

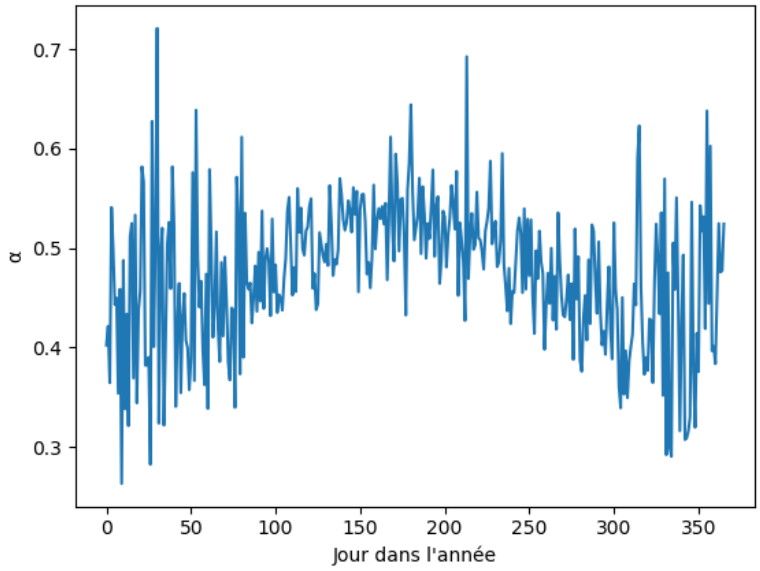


Figure 4.5 – Ratio α sur une année de référence de la période 1982-2018

L'humidité relative journalière est calculée à partir de l'humidité spécifique et de la température moyenne selon la formule empirique de Nadeau et Puiggali (1995):

$$HR_j = \frac{HS_j * 101325}{p_{sat}\left(T_j^{moy}\right) * (0{,}622 + HS)} \tag{4.6}$$

$$p_{sat}\left(T_j^{moy}\right) = exp\left[23{,}3265 - \frac{3802{,}7}{T_j^{moy} + 273{,}18} - \left(\frac{472{,}68}{T_j^{moy} + 273{,}18}\right)^2\right] \tag{4.7}$$

avec HR_j l'humidité relative en %, HS_j l'humidité spécifique en g/kg, $p_{sat}(T)$ la pression de vapeur saturante en Pa.

Calcul des évolutions futures

La statistique de Finkelstein-Schafer est utilisée afin de produire une année météorologique de référence future sur le scénario RCP et la période choisie. La statistique de Finkelstein-Schafer est également utilisée avec les données climatiques d'Aladin sur la période 1994-2005 qui est la période historique des fichiers de la RT2012. Ainsi, les anomalies des variables climatiques (la différence entre le futur et le climat), sont calculées sur la base du même modèle climatique pour ne pas apporter de biais lié à l'usage de données de sources différentes.

L'anomalie d'une variable climatique est calculée de manière absolue pour appliquer un décalage sur la température et l'humidité relative du fichier météorologique actuel. Contrairement à la procédure initiale de *morphing* de Belcher et al. (2005), la moyenne mensuelle d'une variable n'est pas employée pour calculer cette différence absolue mais plutôt la moyenne glissante journalière sur 31 jours telle que :

$$\overline{x_j} = \frac{\left(x_j + \sum_{k=1}^{15} x_{j-k} + \sum_{k=1}^{15} x_{j+k}\right)}{31} \quad \textbf{(4.8)}$$

avec $\overline{x_j}$ la moyenne glissante de la variable climatique au jour j et x_j la valeur de la variable climatique au jour j. La moyenne glissante permet d'inclure plus de variabilité temporelle que la moyenne mensuelle. Elle est aussi plus adéquate que cette dernière pour transformer les premiers et les derniers jours d'un mois.

Cette moyenne glissante est calculée dans l'année climatique actuelle et dans l'année climatique future, puis leur différence absolue est calculée pour chaque jour de l'année telle que :

$$\Delta\overline{x_j} = \overline{x_j}^{\text{futur}} - \overline{x_j}^{\text{actuel}} \quad \textbf{(4.9)}$$

avec $\overline{x_j}^{\text{futur}}$ et $\overline{x_j}^{\text{actuel}}$ la moyenne glissante de la variable climatique au jour j, respectivement dans le futur et dans les données climatiques actuelles.

Transformation de la température

Des moyennes glissantes et des anomalies absolues sont calculées sur les trois composantes de la température : la maximale, la minimale et la moyenne journalière. Cela permet la transformation de ces composantes indépendamment les unes des autres, ce qui améliore la représentativité temporelle, en particulier des vagues de chaleur. L'anomalie absolue appliquée à la température d'une journée et d'une heure données, varie selon une fonction affine par morceau qui dépend des différences absolues calculées sur les trois composantes principales de la température journalière (Figure 4.6).

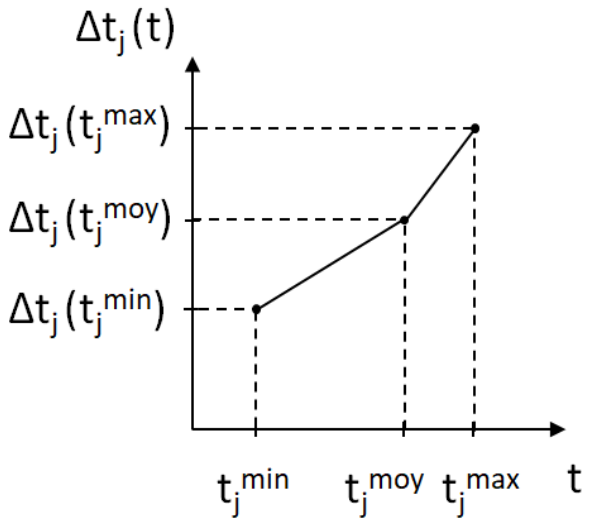


Figure 4.6 – Illustration du décalage absolu en fonction des températures d'un jour j donné

Finalement, l'opération de *morphing* appliquée à chaque température horaire du ficher climatique actuel est :

$$T_{j,h}^{morph} = T_{j,h}^{0} + \Delta T_j\left(T_{j,h}\right) \quad \textbf{(4.10)}$$

avec $T_{j,h}^{0}$ la température actuelle, $\Delta T_j\left(T_{j,h}\right)$ la différence absolue en fonction du jour et de la température, $T_{j,h}^{morph}$ la température transformée, j le jour de l'année et h l'heure de la journée. Cette opération correspond donc à la fois à un décalage et à un étirement puisque le décalage appliqué n'est pas le même selon la température dans la journée.

Transformation de l'humidité relative

La transformation de l'humidité relative est également basée sur un décalage par différence absolue puisque cette variable est exprimée en pourcentage mais sur une échelle absolue de 0 à 100%. L'opération est la suivante :

$$HR_{j,h}^{morph} = HR_{j,h}^{0} + \Delta HR_j \quad \textbf{(4.11)}$$

avec $HR_{j,h}^{0}$ l'humidité relative actuelle, ΔHR_j la différence absolue journalière, $HR_{j,h}^{morph}$ l'humidité relative transformée.

Transformation du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire global est la seule variable fournie dans les données futures. La différence relative entre le rayonnement global futur et le rayonnement global actuel permet d'appliquer une opération d'étirement sur cette variable. En première approximation, cette même différence relative est utilisée pour étirer les valeurs des variables de rayonnement diffus et direct. Cette approximation reflète une relation linéaire entre la composante globale et les composantes diffuse et directe, qui est limitée puisqu'elle ne prend pas en compte la cohérence climatique avec d'éventuels changements de couverture nuageuse.

4.2.5 Résultats

Le *morphing* est appliqué aux données des 8 zones climatiques de la RT2012 pour correspondre aux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 de leur localisation géographique respective, sur les périodes 2030-2064 et 2065-2100. Au total, 32 fichiers météorologiques futurs sont générés. Les résultats des opérations de *morphing* sont validés en comparant les anomalies annuelles des données du modèle Aladin et des fichiers au format TRY initiaux et transformés. Cette comparaison est indiquée dans le Tableau 4.2 pour la zone H1a dont la station météorologique de référence est à Trappes. Elles montrent une très bonne adéquation des anomalies annuelles de température, et de légères surestimations de la hausse du rayonnement global (+4 % au maximum) et de la baisse de l'humidité relative dans le futur (-1,5 %) qui doivent être liées aux opérations de morphing sélectionnées.

Tableau 4.2 – Comparaison des anomalies annuelles par rapport à la période 1994-2005 des données de *morphing* et des données du modèle RCM Aladin pour la zone H1a (Trappes)

H1a, anomalie annuelle par rapport à 1994-2005	RCP45				RCP85			
	2031-2065		2066-2100		2031-2065		2066-2100	
	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY
Température max (°C)	+1,13	+1,13	+2,2	+2,2	+1,65	+1,65	+3,78	+3,78
Température moyenne (°C)	+1,09	+1,08	+2,16	+2,15	+1,33	+1,32	+3,43	+3,42
Température minimale (°C)	+1,02	+1,02	+2,09	+2,09	+1,01	+1,01	+3,08	+3,08
Rayonnement global (%)	+0,7	+1,83	+2,8	+4,41	+5,7	+8,59	+8,7	+12,5
Humidité relative (%)	-0,98	-1,4	-1,86	-2,4	-1,98	-2,6	-5,14	-6,6

Les comparaisons des anomalies annuelles sur les autres zones climatiques sont données en Annexe G. Elles montrent des tendances similaires à celles de la zone H1a avec une augmentation de la température moyenne par rapport à la période 1994-2005 de l'ordre de +2 °C selon le scénario RCP 4.5 et de l'ordre de +3 °C selon le scénario RCP 8.5, d'ici la période 2066-2100. Globalement, l'augmentation est plus prononcée sur les températures maximales et moins prononcé sur les températures minimales avec quelques variations de cette tendance à La Rochelle (zone H2b) et à Nice (zone H3). Le rayonnement global présente une augmentation et l'humidité relative présente une diminution dans les scénarios avec des tendances plus prononcées dans celui du RCP 8.5. La température extérieure issue du *morphing* pour la localisation de Trappes (zone H1a) est présentée à la Figure 4.7 pour le scénario RCP 4.5 et à la Figure 4.8 pour le scénario RCP 8.5.

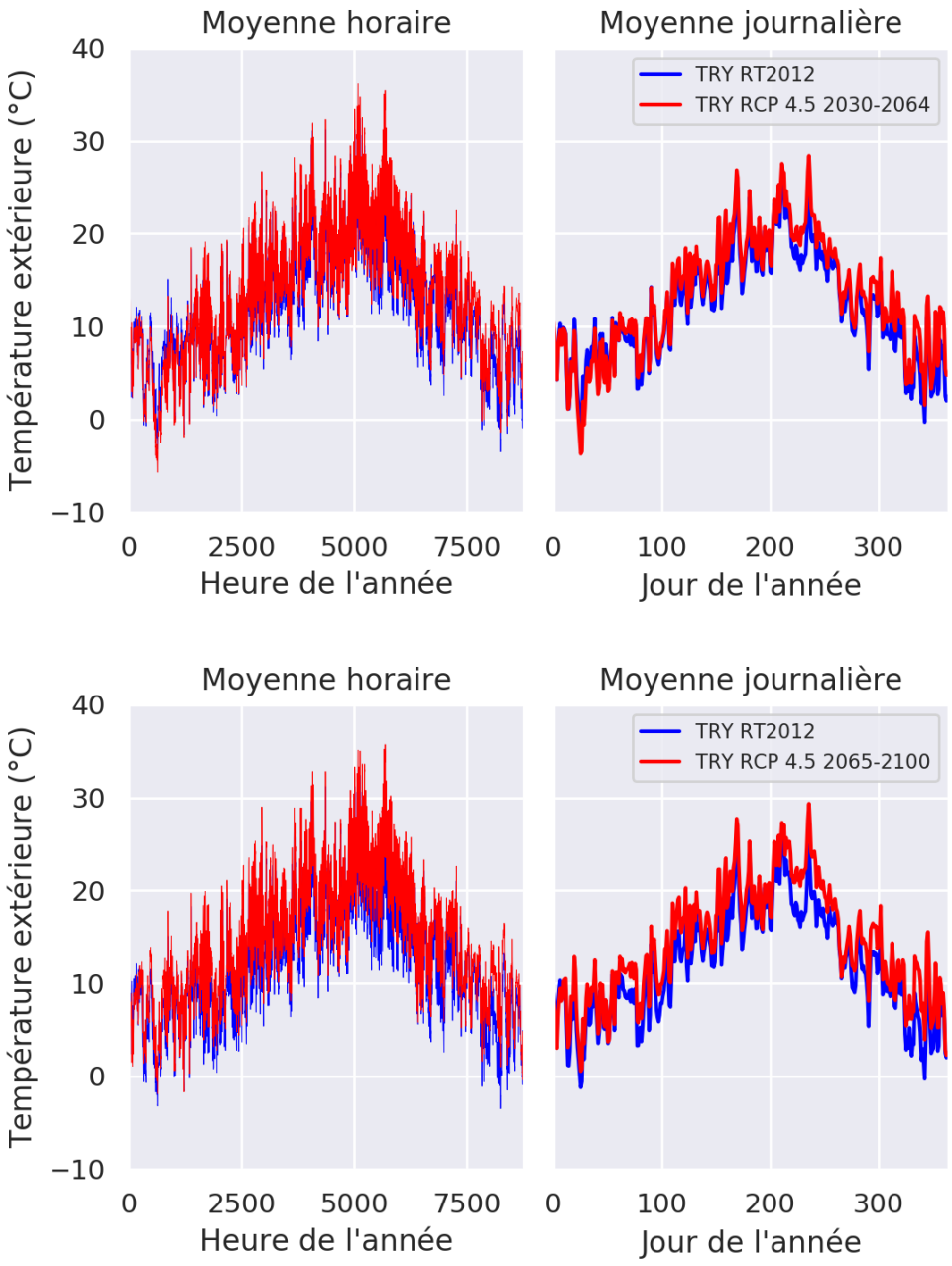


Figure 4.7 – Température extérieure des données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 4.5

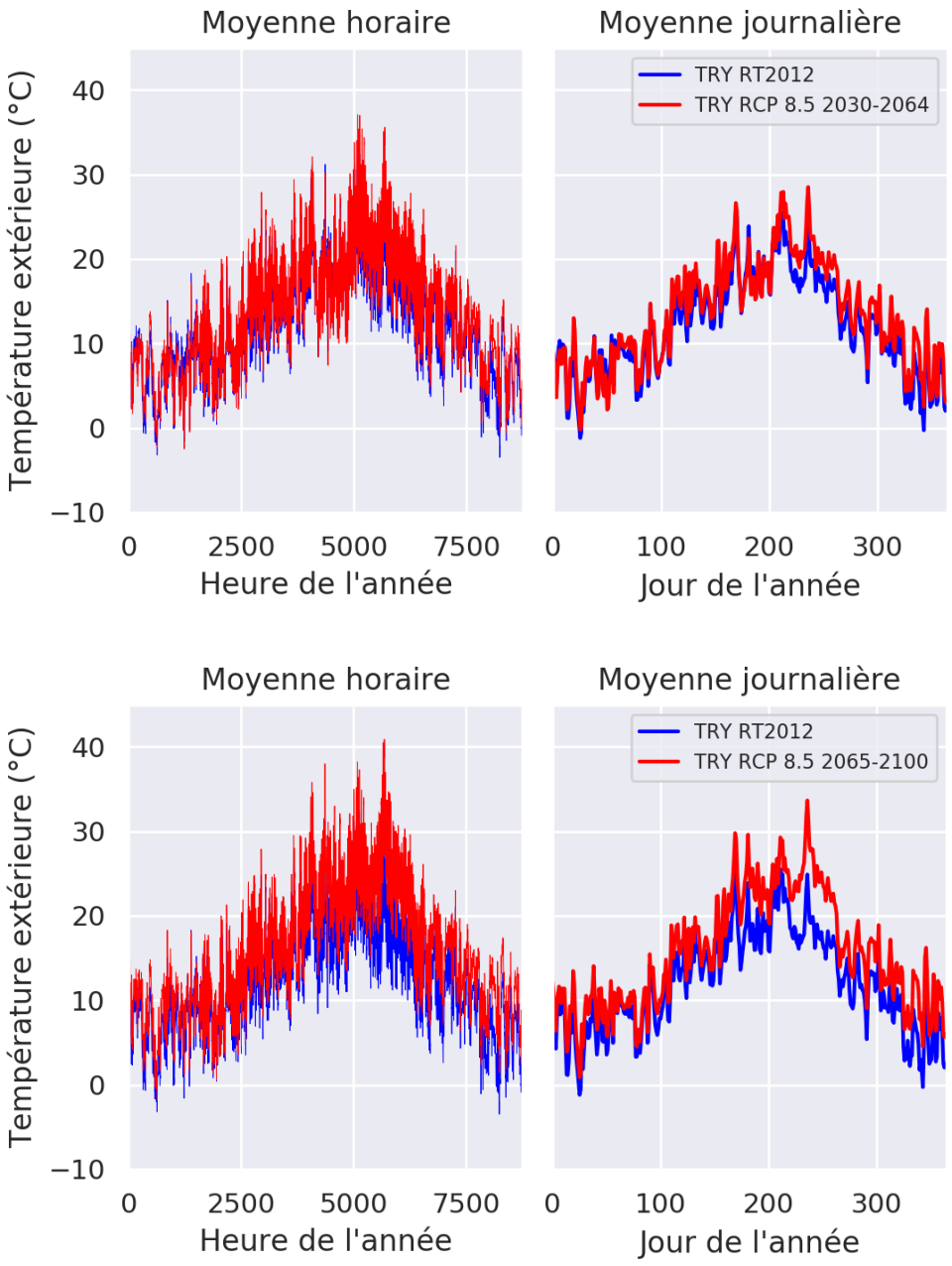


Figure 4.8 – Température extérieure des données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 8.5

L'anomalie mensuelle de température est présentée à la Figure 4.9 et montre que l'augmentation de température est la plus importante en août, avec entre +2,3 à +3,8 °C sur le scénario RCP 4.5 et entre +3,1 °C et +6,2 °C sur le scénario RCP 8.5. Les augmentations sont les moins importantes sur les mois de janvier et de février. Dans la période

2030-2064, le *morphing* peut même induire une légère baisse de température sur ces mois tout en respectant l'augmentation globale de température sur l'année. Le mois de décembre présente des augmentations relativement élevées par rapport aux autres mois.

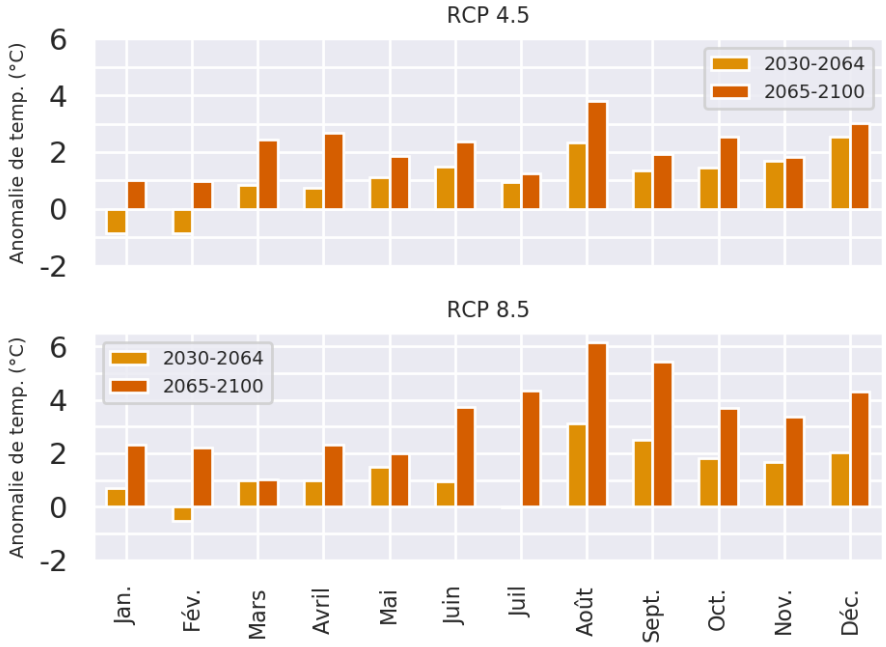


Figure 4.9 – Anomalies mensuelles moyennes de la température extérieure des données issues du *morphing* par rapport aux données climatiques de la RT2012 pour la station météorologique de Trappes

La température extérieure durant le mois d'août est présentée à la Figure 4.10. Dans les scénarios RCP 4.5 et 8.5, la température dépasse plusieurs fois 35 °C alors que dans les données initiales de la RT 2012, la température ne dépasse pas cette valeur. Le scénario RCP 8.5 mène à long terme à deux pics de température au-delà de 40 °C. Par ailleurs, les écarts aux températures de la RT 2012 sont plus importants vers la fin du mois d'août déplaçant le pic de température qui était initialement le 31 juillet. Ce changement dans le profil de température est possible grâce aux modifications apportées à la procédure initiale de *morphing* et à la disponibilité de données sur les maxima et les minima de température. Une translation basée sur la moyenne mensuelle aurait décalé les températures de la même façon.

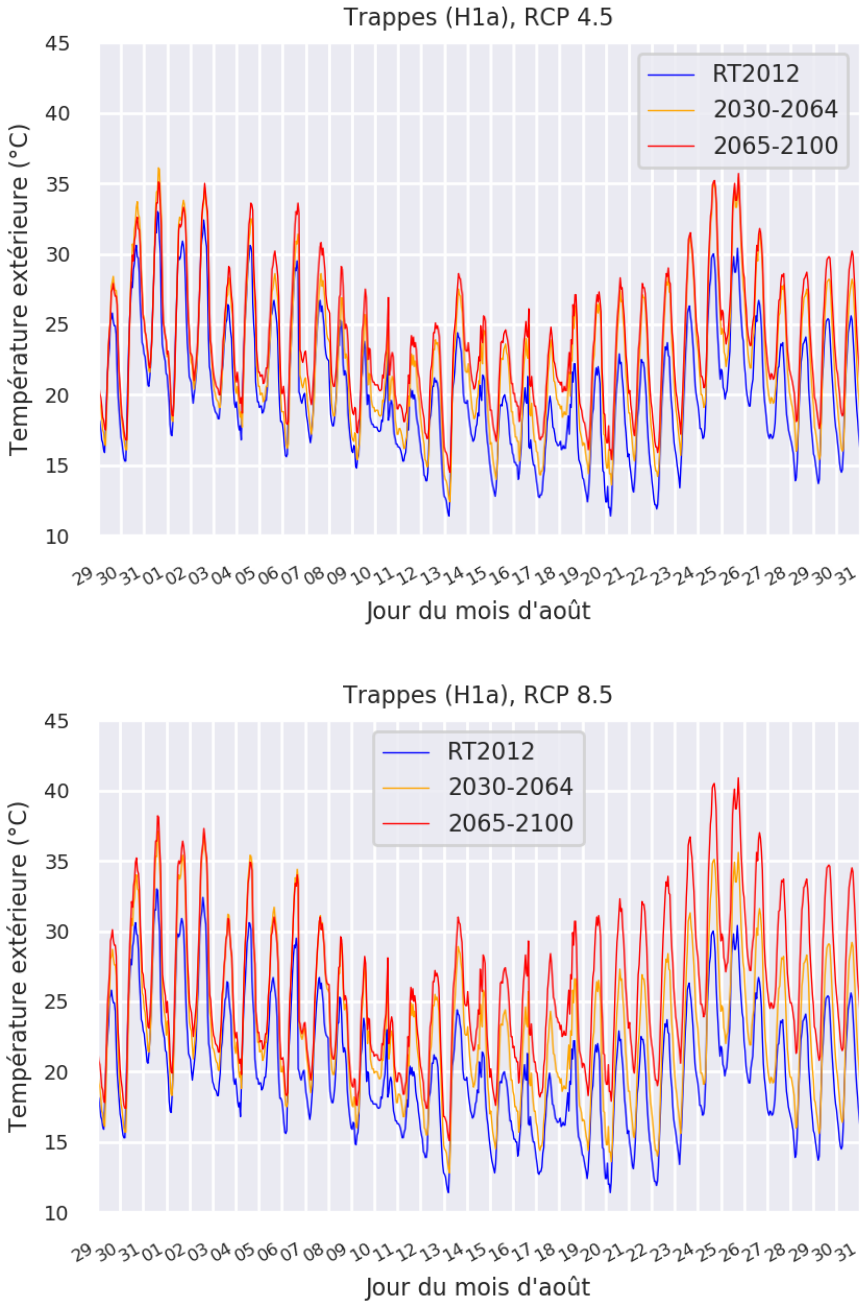


Figure 4.10 – Température extérieure du mois d'août dans les scénarios RCP 4.5 et 8.5

L'analyse des degrés jours unifiés dans le Tableau 4.3, synthétise la diminution des besoins de chauffage et l'augmentation des besoins de rafraîchissement qui peuvent être attendus selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5.

Tableau 4.3 – DJU en base 18 des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à Trappes (H1a)

DJU	RT2012	RCP 4.5		RCP 8.5	
Période	1994-2005	2030-2064	2065-2100	2030-2064	2065-2100
Chauffage	2048	1792	1521	1733	1342
Rafraîchissement	286	433	552	465	848

En ce qui concerne le rayonnement global, l'augmentation annuelle moyenne des scénarios futurs est répartie de façon hétérogène sur l'année et comprend des périodes de diminution du rayonnement avec une augmentation durant l'été (Figure 4.11 et Figure 4.12).

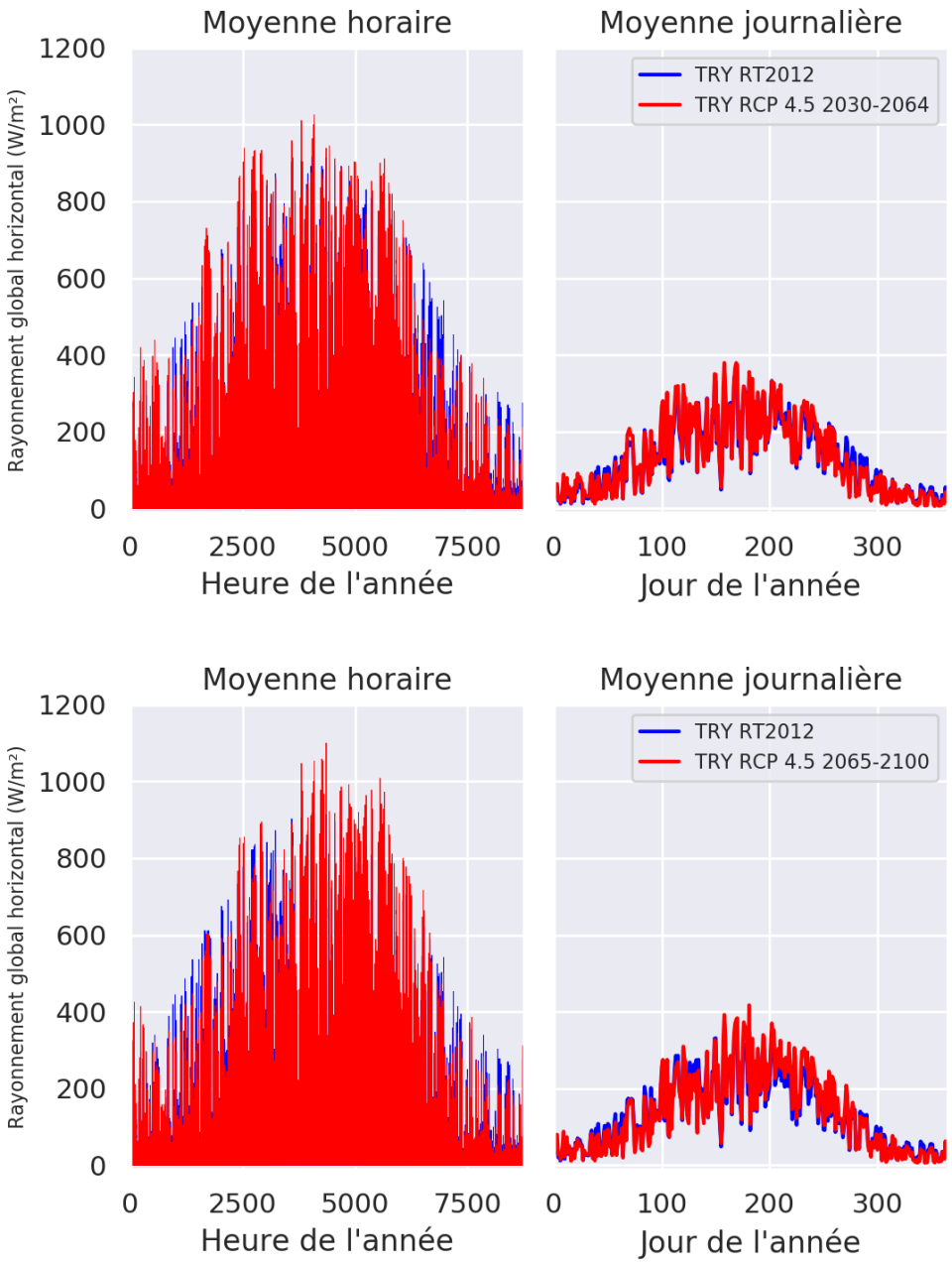


Figure 4.11 – Rayonnement global horizontal des données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 4.5

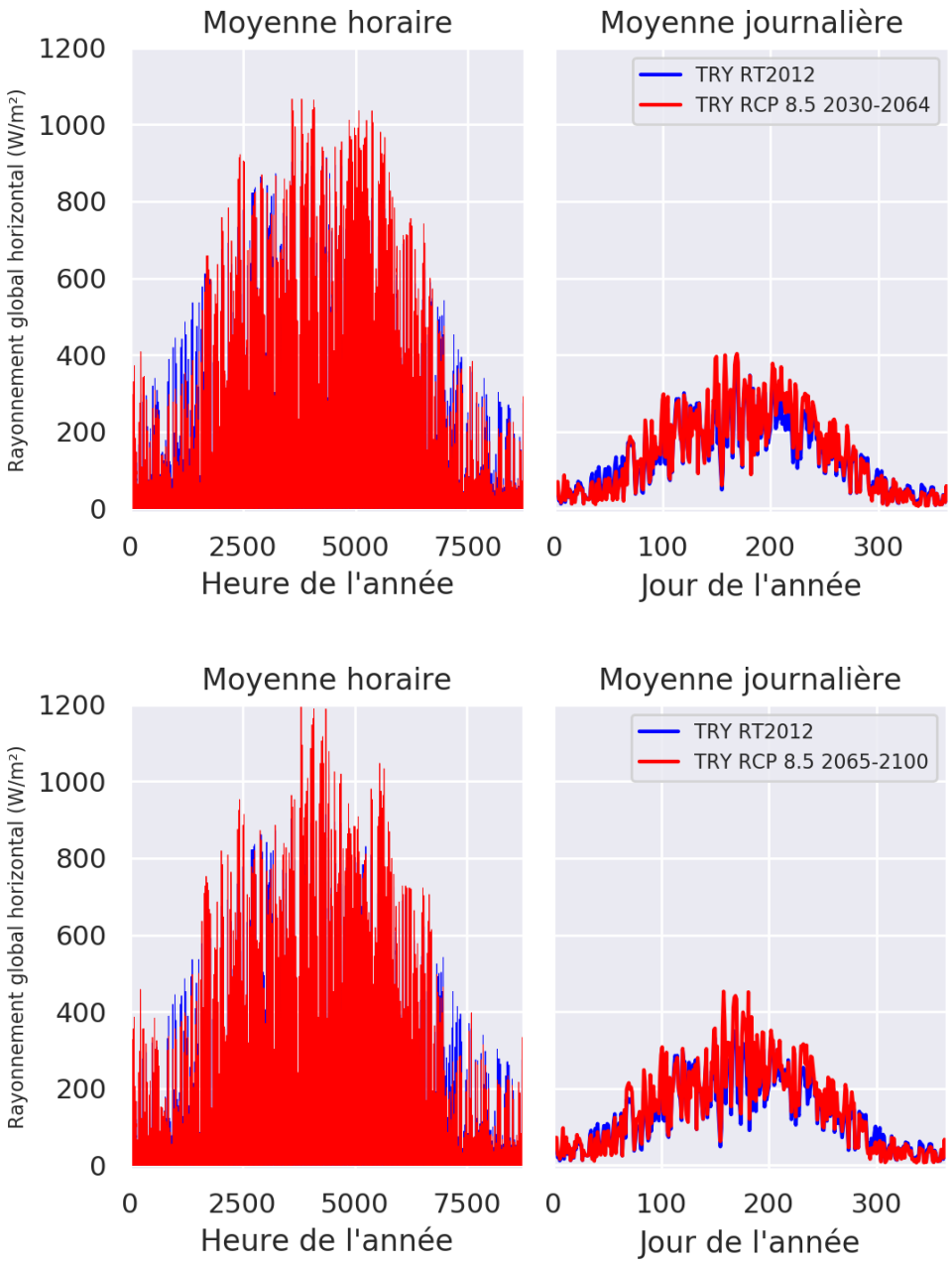


Figure 4.12 – Rayonnement global horizontal des données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 8.5

L'analyse de l'humidité relative montre une diminution estivale dans les deux scénarios qui devient importante à long terme dans le scénario RCP 8.5 (Figure 4.13).

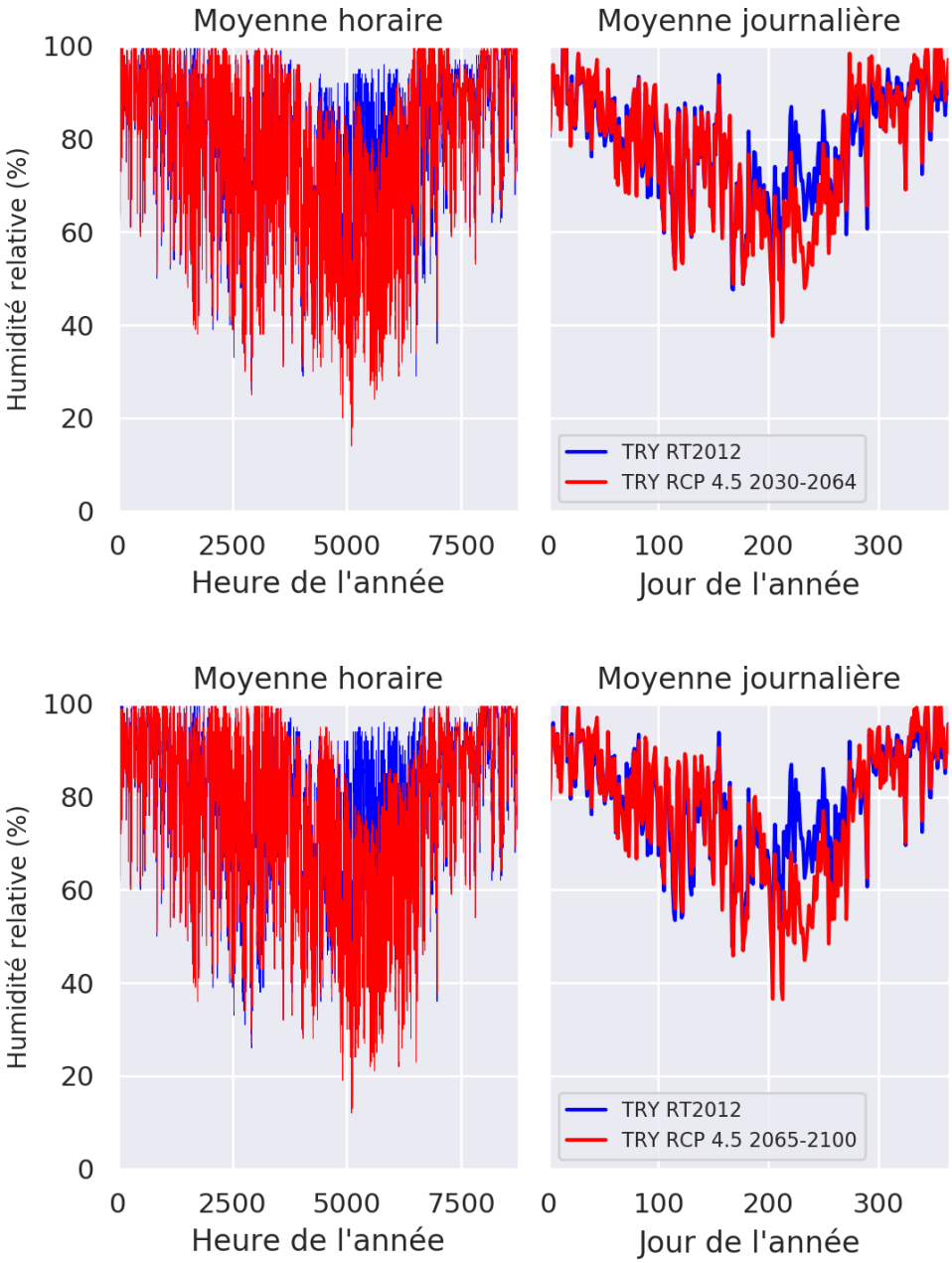


Figure 4.13 – Humidité relative dans les données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 4.5

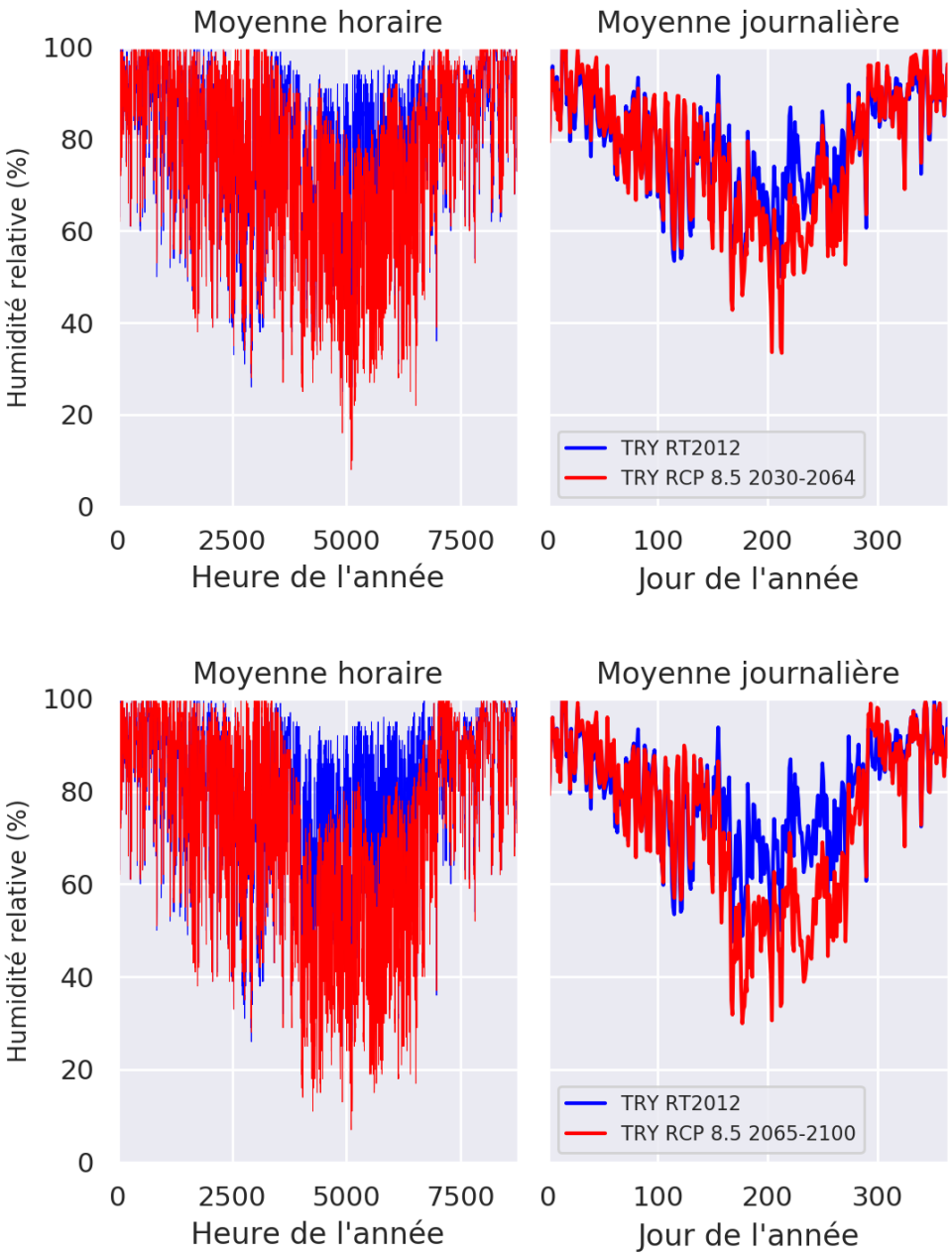


Figure 4.14 – Humidité relative dans les données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 8.5

La méthode de *morphing* qui a été employée permet d'obtenir des données climatiques qui conservent une variabilité temporelle cohérente entre la température, l'humidité relative et le rayonnement malgré une surestimation de la moyenne annuelle pour cette dernière. La relation entre ces trois variables est surtout visible durant la période estivale

où la température et le rayonnement augmenteront encore davantage dans le futur, et à l'inverse l'humidité relative diminuera. La production d'électricité photovoltaïque sera affectée positivement par le rayonnement mais négativement par la température. La consommation de climatisation sera aussi impactée négativement par les plus fortes températures tandis que l'humidité relative plus faible pourra diminuer la consommation à température égale. Au final, le calcul du bilan d'énergie estival futur d'un bâtiment zéro-énergie sera plus réaliste.

4.2.6 Limites

La limite généralement évoquée à propos de la méthode de *morphing* est qu'elle ne modifie pas suffisamment le profil temporel du climat initial. Toutefois, l'usage d'une moyenne glissante sur une période équivalente à un mois, et la disponibilité des températures maximales et minimales journalières dans les données climatiques futures permettent d'apporter de la variabilité temporelle aux données climatiques de base et ont fait apparaître de nouveaux pics de température en été.

Plusieurs incertitudes subsistent néanmoins. La variabilité naturelle du climat tout d'abord, qui n'est pas traitée par cette méthode. Pour ce faire, il faudrait créer et propager plusieurs années climatiques futures ce qui n'est pas envisagé en vue de l'intégration en optimisation multicritère robuste de ces travaux. On considère donc une unique année climatique de référence suffisamment représentative de la période considérée. Une autre source d'incertitude est la méthode de *morphing* en elle-même et les choix qui sont fait pour les calculs des translations et des homothéties. Ici, des écarts relativement importants sont constatés sur les évolutions du rayonnement et, dans une moindre mesure, de l'humidité relative par rapport aux écarts issus des données futures du modèle climatique Aladin (voir le Tableau 4.2 précédent). L'analyse d'incertitude et l'optimisation des choix et des paramètres de la méthode *morphing* permettrait de réduire l'incertitude de ce point de vue. Enfin, une source importante d'incertitude réside dans les modèles climatiques qui sont utilisés directement ou indirectement. En premier lieu, le modèle climatique régionalisé qui a été choisi est Aladin pour le choix des variables climatiques qu'il offre. Mais il existe de nombreux autres modèles régionaux, par exemple WRF, CLM, RCA,

HIRHAM, pour ne citer qu'une partie de ceux disponibles sur le site de la Drias. Ces modèles utilisent les données issues de modèles de circulation globale dont il existe également une grande diversité. À titre d'exemple, plus d'une quarantaine de modèles de circulation globale ont été inter-comparés dans le programme CMIP5. La qualité des données d'un modèle climatique régional est donc directement affectée par les incertitudes du modèle de circulation globale utilisé. Des travaux d'inter-comparaison des couplages entre les modèles régionaux et globaux ont été réalisés notamment dans le projet Euro-Cordex (Jacob et al., 2014) qui a produit des données climatiques régionalisées dans toute l'Europe selon les différents scénarios RCP. Une analyse d'incertitude sur le choix de ces modèles permettrait d'évaluer la qualité globale des données prospectives disponibles. Elle peut être réalisée en construisant des fichiers climatique à partir des différentes combinaisons de modèle régionaux et globaux issus du projet Euro-Cordex dont les données sont disponibles gratuitement sur le service Climate Data Store[23]. Toutefois elle n'a pas été inclue dans ces travaux qui cherchent principalement à établir une preuve de concept de l'approche prospective.

4.3 Évolution du système électrique

4.3.1 Méthode de développement

Le gestionnaire du réseau RTE propose dans son bilan prévisionnel 2017 (BP 2017) quatre scénarios d'évolution du parc électrique français à l'horizon 2035 nommés Ampère, Hertz, Volt et Watt (RTE, 2017). Ces scénarios ont été construits grâce à des modèles économique d'équilibre offre-demande et d'hypothèse sur 6 aspects clés :

- la trajectoire d'évolution de la consommation nationale d'électricité ;
- le rythme de déploiement des énergies renouvelables ;
- la trajectoire d'évolution de la capacité de production des centrales nucléaires ;

[23] https://cds.climate.copernicus.eu/

- la trajectoire d'évolution des prix du CO_2 et des combustibles ;
- la trajectoire d'évolution des capacités transfrontalières d'interconnexion ;
- la trajectoire d'évolution des parcs de production dans les pays transfrontaliers.

Les hypothèses principales sur lesquelles reposent ces scénarios sont données dans le Tableau 4.4.

Sur le site « Open data – Réseaux énergies[24] » et dans le BP 2017 (RTE, 2017) des données pour chacun des scénarios sont disponibles aux horizons 2025, 2030 et 2035 :

- les capacités de production en MW et les productions en MWh pour chaque technologie ;
- la consommation nationale ;
- le solde des échanges ;
- les facteurs de charge des technologies de production.

L'ensemble de ces données et de ces hypothèses est fourni en entrée du modèle de système électrique de Roux et al. (2017). Les données climatiques futures générées par *morphing* pour les 8 zones climatiques de la RT 2012 sont utilisées conjointement aux hypothèses du réseau pour assurer une cohérence physique et temporelle entre la SED de bâtiment et les futurs mix de production d'électricité. La météorologie joue également un rôle dans le profil de la demande nationale thermo-sensible qui va influencer l'usage de technologies de production de pointe et dans la production d'électricité photovoltaïque. Douze séries temporelles du mix électrique sont ainsi générées : Ampère 2025, 2030, 2035 ; Hertz 2025, 2030, 2035 ; Volt 2025, 2030, 2035 et Watt 2025, 2030, 2035.

Ces scénarios de moyen et long terme sont complétés par des scénarios de court terme issus du bilan prévisionnel 2019 de RTE (2019). Les capacités installées de l'ensemble des scénarios sont présentées à la Figure 4.15.

[24] https://opendata.reseaux-energies.fr/

Tableau 4.4 – Hypothèses principales des scénarios prospectifs du BP 2017 de RTE

Scénario	Description
Ampère	Faible diminution de la consommation électrique. Déploiement des énergies renouvelables selon la PPE ambitieuse. Une centrale nucléaire est fermée quand les nouvelles capacités installées renouvelables permettent de remplacer sa production moyenne annuelle. Forte hausse des coûts du CO_2 et des combustibles. Fort développement des interconnexions. 700 000 rénovations thermiques par an. 15,6 millions de véhicules électriques.
Hertz	Faible diminution de la consommation électrique. Déploiement des énergies renouvelables selon la PPE minimale. Fermeture des centrales nucléaires jusqu'à atteindre 50% de leur production annuelle sans augmentation des émissions de CO2. Hausse médiane des coûts du CO_2 et des combustibles. Développement médian des interconnexions. 700 000 rénovations thermiques par an. 15,6 millions de véhicules électriques.
Volt	Diminution moyenne de la consommation électrique. Déploiement des énergies renouvelables selon la PPE minimale. Une centrale nucléaire est fermée quand de nouvelles capacités installées renouvelables ou thermiques permettent de remplacer sa production moyenne annuelle. Hausse médiane des coûts du CO_2 et des combustibles. Fort développement des interconnexions. 8,3 millions de véhicules électriques.
Watt	Forte diminution de la consommation électrique. Déploiement des énergies renouvelables selon la PPE ambitieuse. Fermeture des centrales nucléaires à l'issue de la 4ème visite décennale. Forte hausse des coûts du CO_2 et des combustibles. Développement médian des interconnexions. 500 000 rénovations thermiques par an. 5,5 millions de véhicules électriques.

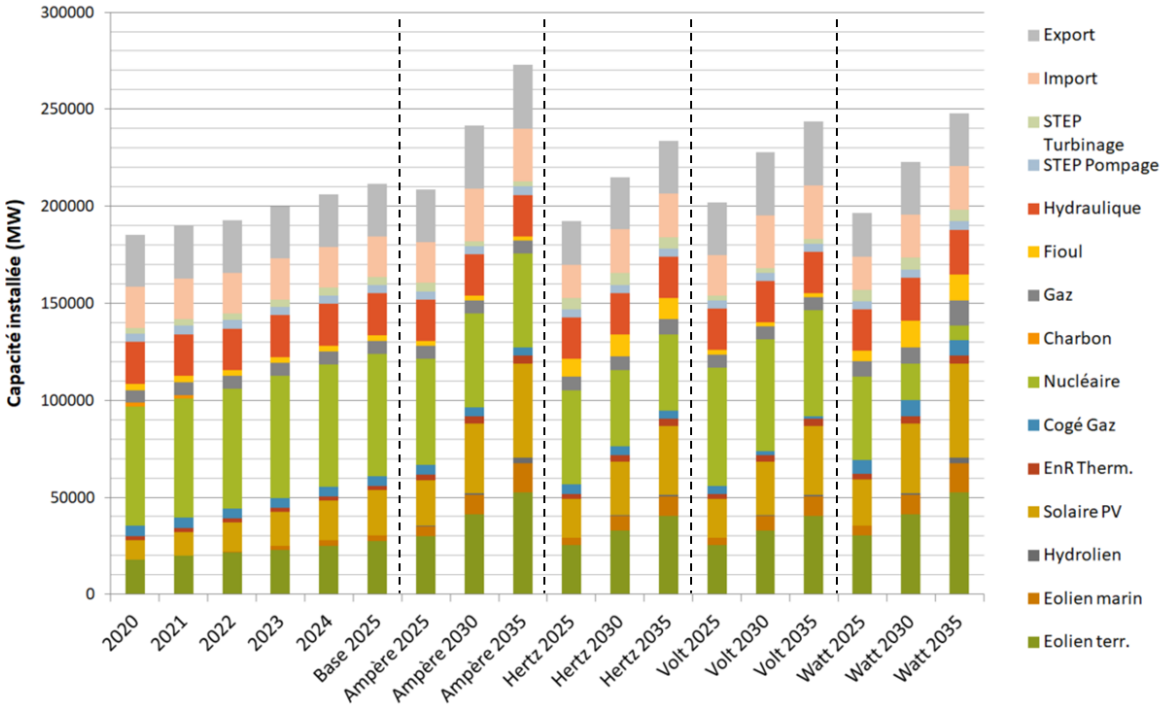


Figure 4.15 – Capacités installées des scénarios des bilans prévisionnels 2017 et 2019 de RTE

4.3.2 Hypothèses sur l'import et les systèmes solaires PV

En ce qui concerne le calcul des impacts environnementaux de l'électricité, des données prospectives sont utilisées pour caractériser les futurs mix d'import et l'impact de la future production d'électricité photovoltaïque sur le réseau. Le BP 2017 fournit des hypothèses sur les interconnexions avec les pays voisins selon deux trajectoires principales, la trajectoire « médiane » qui prévoit un rythme moyen de développement des capacités d'échange avec les pays voisins, et la trajectoire « haute » qui prévoit un rythme plus soutenu. Ces trajectoires sont basées sur les travaux prospectifs de l'ENTSO-E (le réseau européen des gestionnaires de réseau de transport d'électricité) sur l'évolution du réseau électrique Européen dans son rapport TYNDP 2016 (*Ten-Year Network Development Plan*) (ENTSO-E, 2015). En première approximation une relation linéaire est appliquée entre l'évolution des capacités d'échange avec un Pays voisin et sa part dans le mix d'import dans chaque hypothèse d'interconnexion (Figure 4.16). Les hypothèses

d'évolution des interconnexions respectives aux scénarios d'évolution de RTE sont indiquées dans le

Tableau 4.5.

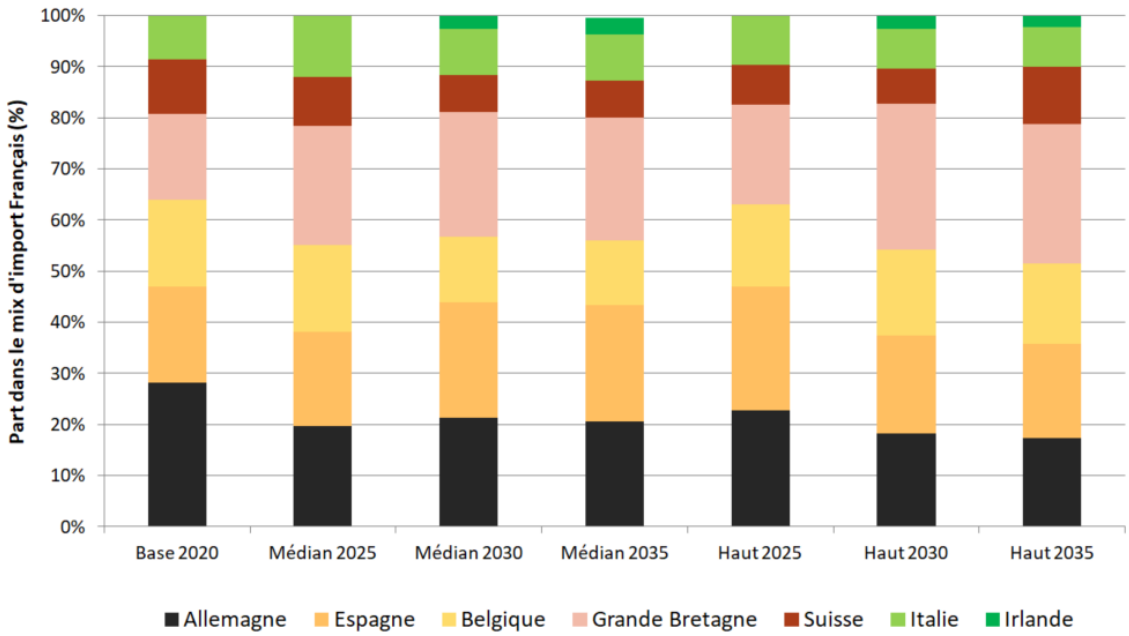


Figure 4.16 – Composition des imports d'électricité à partir de scénarios d'interconnexion

Tableau 4.5 – Hypothèse d'évolution des interconnexions dans chaque scénario de RTE

Hypothèse interconnexion	Scénarios
Médiane	Hertz, Watt
Haute	Ampère, Volt

L'évolution du mix de production d'électricité des pays voisins est le facteur principal dans la détermination de l'impact de l'import d'électricité. Avec la possible diminution des capacités installées des technologies modulables fossiles et nucléaire en France, la part d'import pourrait augmenter pour compenser les intermittences d'une production croissante d'électricité d'origine renouvelable. Le BP 2017 de RTE considère des scénarios d'évolution des capacités installées des différentes technologies de production chez les

pays voisins selon des hypothèses « basse », « moyenne » et « haute ». Les trajectoires sur lesquelles repose chaque scénario sont indiquées dans le Tableau 4.6.

Tableau 4.6 – Hypothèses d'évolution des capacités installées des pays voisins par technologie de production

Scénario	Énergies renouvelables	Énergie fossile	Énergie nucléaire
Ampère	Forte	Basse	Basse
Hertz			
Watt			
Volt	Moyenne		

Ces hypothèses indiquent les capacités installées en MW de certaines technologies de production d'un Pays voisin mais pas son mix de production complet. Dans leur rapport TYNDP 2018, ENTSO-E propose des scénarios de mix de production électrique pour tous les pays de l'UE selon différentes hypothèses socio-économiques et réglementaires :

- *Sustainable Transition (ST)* : se base sur l'hypothèse de réglementations nationales fortes sur la réduction d'émission de GES, la subvention du développement des énergies renouvelables et l'usage complet des infrastructures existantes.
- *Distributed Generation (DG)* : se base sur l'hypothèse de changements provenant principalement de la consommation et des lois du marché avec le développement de technologies de production décentralisées et de batteries.
- *Global Climate Action (GCA)* : une décarbonisation accélérée du système de production d'énergie avec un développement important des énergies renouvelables dans le gaz et l'électricité. Ce scénario est plus ambitieux que *ST*.
- *Best Estimate (BE)* : scénario qui représente la meilleure estimation à court-terme du système de production électrique.

Les scénarios d'ENTSO-E sur les capacités installées des pays voisins ont été sélectionnés en fonction de la correspondance de leurs hypothèses avec celles des scénarios

de RTE en comparant notamment les capacités installées par technologie. L'attribution des scénarios de capacités installées à chaque pays et pour chaque période temporelle est indiquée dans le Tableau 4.7. RTE ne fournissant pas de données au-delà de 2035, elles sont alors extrapolées jusqu'à la fin de vie du bâtiment en 2100.

Tableau 4.7 – Scénario de capacités installées du TYNDP 2018 d'ENTSO-E sélectionnés

Période	Allemagne	Espagne	Belgique	Royaume-Uni	Suisse	Italie	Irlande
2025-2029	Best 2025	Best 2025	Best 2025	Best 2025	Best 2025	Best 2025	Best 2025
2030-2034	ST 2030	ST 2030	ST 2030	ST 2030	ST 2030	ST 2030	ST 2030
2035-2100	DG 2040	ST 2040	ST 2040	ST 2040	ST 2040	GCA 2040	ST 2040

La combinaison des hypothèses sur les interconnexions et sur les capacités installées futures des pays, permet d'obtenir des mix d'import d'électricité prospectifs. L'intensité carbone du kWh de l'électricité importée en France est calculée avec l'inventaire d'ecoinvent 3.4 et présenté à la Figure 4.17. Ces trajectoires montrent une réduction moyenne de 45 % de l'intensité carbone de l'électricité importée en France d'ici à 2035.

Enfin, les données d'inventaire de la production d'électricité photovoltaïque sur le réseau sont modifiées pour refléter les améliorations technologiques dans la fabrication des panneaux, l'installation de nouveaux panneaux et l'arrêt d'anciens systèmes en fin de vie. Les données de fabrication du système solaire PV qui ont été mises à jour (voir le Chapitre 2) sont intégrées sur deux périodes temporelles selon les hypothèses suivantes (Tableau 4.8): sur la période 2020-2035, 50 % de l'inventaire est composé des technologies actuelles mises à jour ; après 2035, 100 % de l'inventaire est composé des technologies actuelles mises à jour.

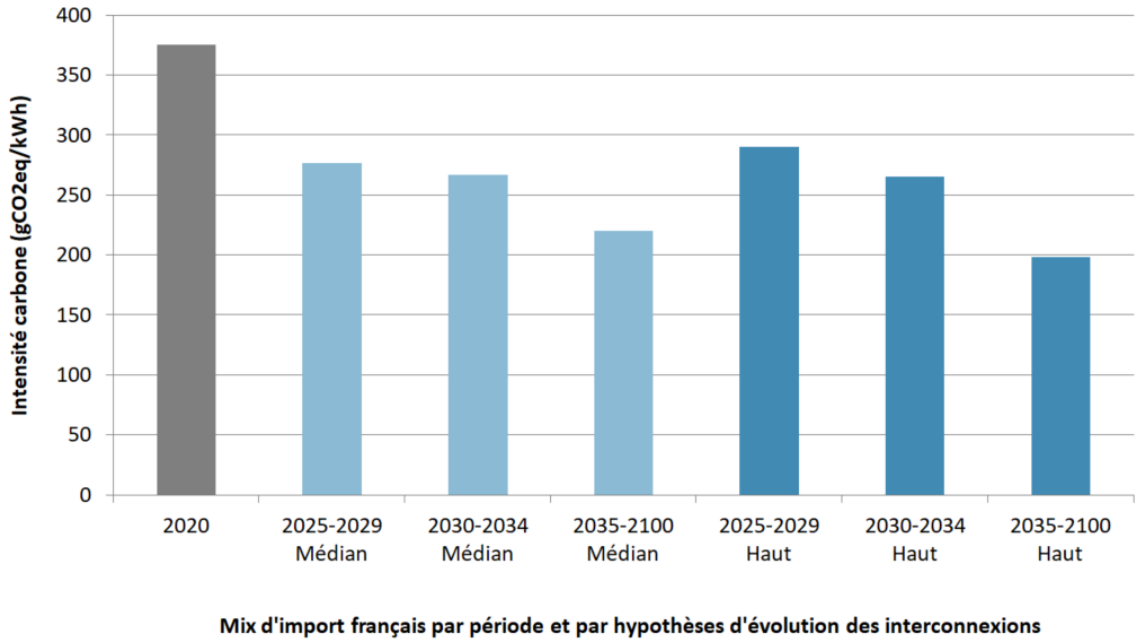


Figure 4.17 – Intensité carbone de l'import de l'électricité en France selon les deux hypothèses d'évolution des interconnexions

Tableau 4.8 – Données d'inventaire prospectives sur la production d'électricité PV du réseau

Fiche ecoinvent 3.4	Part	2020-2034	2035-2100
electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si	75 %	50 % fiche initiale 50% fiche mise à jour	100 % fiche mise à jour
electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted	20 %		
electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted	5 %		

L'intensité carbone prospective du kWh d'électricité PV produite sur le réseau est présentée à la Figure 4.9.

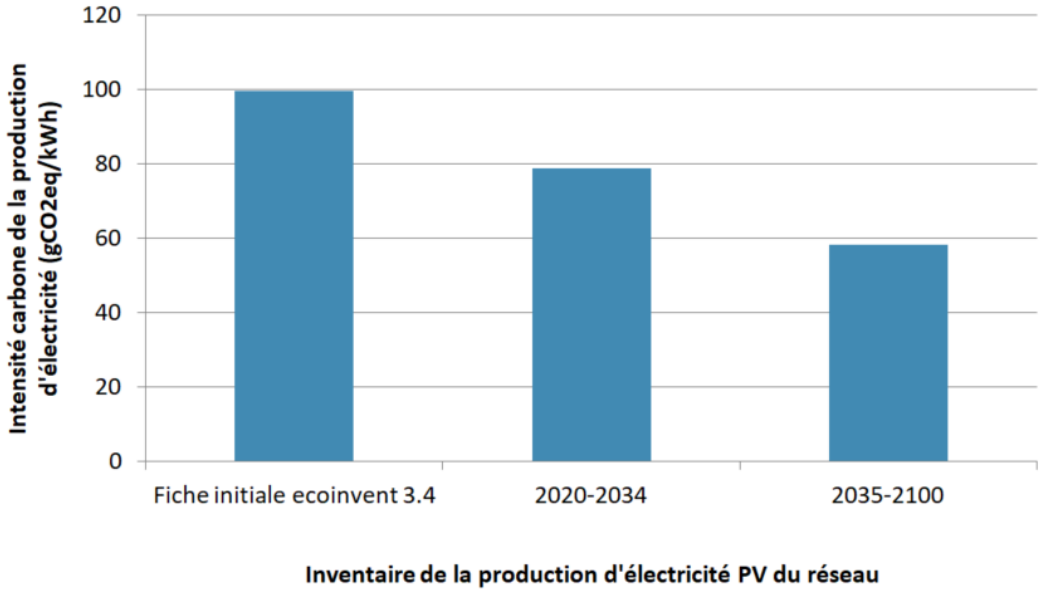


Figure 4.9 – Intensité carbone prospective de la production d'électricité PV du réseau

Les hypothèses prospectives considérées mènent à une diminution de l'intensité carbone de la production d'électricité PV sur le réseau de 20 à 40 % par rapport aux données d'inventaire initiales d'ecoinvent 3.4 sans modification. Malgré ces réductions d'impact importantes, l'approche reste conservatrice et la représentativité technologique pourrait être davantage améliorée. Les valeurs de 80 et 60 gCO_2/kWh d'électricité PV produite sont encore relativement élevées par rapport aux données de la littérature. Dominguez-Ramos et al. (2010) proposent une valeur de 35 gCO_2/kWh pour les systèmes solaires PV poly-cristallins fabriqué en 2007 qui diminue à 12 gCO_2/kWh en 2030. Marini et al. (2014) proposent une valeur moyenne de 24 gCO_2/kWh pour les systèmes solaires PV CdTe actuels qui diminue autour de 10 gCO_2/kWh en 2035. Une étude plus approfondie des taux de renouvellement et d'installation de nouveaux systèmes solaires PV du parc français, ainsi que l'évaluation des impacts environnementaux historiques et futurs de leur fabrication améliorerait la qualité de ces scénarios prospectifs.

4.3.3 Résultats

Un total de 17 mix électriques dynamiques sont générés : les scénarios de court terme de 2020 à 2024 ainsi que les scénarios Ampère, Hertz, Volt et Watt aux horizons 2025, 2030 et 2035. L'erreur sur les mix de production calculés par le modèle du système électrique est évaluée en comparant les productions annuelles par technologie à celles données par RTE. L'écart de production d'une technologie entre le modèle et celui de RTE est exprimé en pourcentage absolu. L'erreur globale pour un scénario et une année donnée est la moyenne de ces erreurs pondérées par leur part dans le mix annuel. Ainsi par exemple, un écart de l'ordre de 100 % sur la production annuelle d'une technologie n'est pas important si sa production annuelle ne représente que 0,5 % de la production totale. À l'inverse, de faibles écarts sur des technologies prépondérantes dans le mix annuel ont plus d'importance relative. Les erreurs pondérées du mix annuel et l'erreur absolue sur la consommation nationale sont données dans le Tableau 4.10 pour chaque scénario. Les erreurs sont globalement assez faibles avec seulement deux années types qui ont une erreur de plus de 10 %, Volt 2035 (11,4 % d'erreur) et Ampère 2035 (13,5 % d'erreur). Les autres années types ont des erreurs qui varient de 3,4 % à 9,4 %. L'erreur a tendance à être moins élevée pour les scénarios à l'horizon 2025 et à augmenter aux horizons 2030 et 2035. Ceci s'explique par un éloignement des conditions pour lesquelles le modèle a été initialement développé et calibré, notamment en ce qui concerne les productions d'énergie nucléaire et renouvelable, ainsi que les capacités et les profils d'import et d'export qui sont basés sur des données historiques.

RTE ne fournissant pas les données de ses scénarios à des résolutions inférieures à l'année, la validation reste limitée. De nombreuses incertitudes subsistent en particulier sur les profils horaires de l'import/export qui évoluent en fonction des interconnexions, des capacités installées des pays voisins et des conditions climatiques à l'échelle européenne qui vont fortement influencer l'offre et la demande européenne. Une autre incertitude réside dans le classement des technologies modulables à actionner en priorité qui n'a pas été modélisé de manière prospective dans le modèle. Une autre source peut provenir du fait que RTE ne prend pas en compte de changement climatique dans la construction de ses

scénarios. À l'échelle de la production annuelle d'électricité l'erreur est suffisamment faible pour une utilisation exploratoire de ces mix prospectifs en ACV.

Tableau 4.10 – Erreurs moyennes pondérées du mix de production annuel issu du modèle par rapport aux données de RTE

Scénario	Année	Erreur moyenne pondérée du mix annuel	Scénario	Année	Erreur moyenne pondérée du mix annuel
Base	2020	3,5 %	Hertz	2025	4,1 %
	2021	6,4 %		2030	3,7 %
	2022	4,5 %		2035	5,7 %
	2023	5,6 %	Volt	2025	5,1 %
	2024	6,7 %		2030	8,9 %
	2025	5,7 %		2035	11,4 %
Ampère	2025	5,8 %	Watt	2025	4,0 %
	2030	9,1 %		2030	9,4 %
	2035	13,5 %		2035	8,8 %

L'intensité carbone annuelle de chacun des mix est présentée à la Figure 4.18 d'après les données des bilans prévisionnels 2017 et 2019 de RTE. Les données des scénarios Ampère, Hertz, Volt et Watt qui proviennent du BP 2017 sont antérieures aux données de court terme du BP 2019. L'émission de GES annuelle de l'année 2025 a été réévaluée à la baisse par RTE dans le BP 2019, avec 23 gCO_2/kWh d'après le BP 2019 contre 30 à 47 gCO_2/kWh dans les scénarios du BP 2017. Cette différence peut provenir de changements dans les hypothèses et les données utilisées par RTE à mesure que les premiers scénarios se confirment ou s'infirment dans le temps.

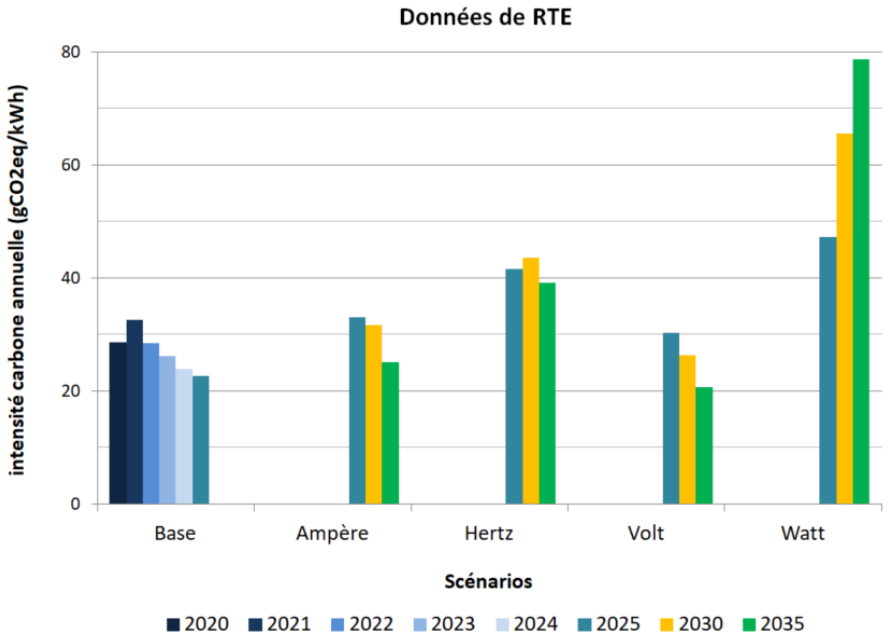


Figure 4.18 – Moyenne annuelle de l'émission de GES des scénarios d'après les BP 2017 et 2019 de RTE

Au sein des scénarios du BP 2017, les trajectoires Volt et Ampère aboutissent aux plus faibles intensités carbone du mix avec respectivement 21 et 25 gCO_2/kWh. Le scénario Watt est le plus émetteur et atteint 79 gCO_2/kWh à l'horizon 2035. Ce scénario correspond aux hypothèses de développement soutenu des énergies renouvelables et la diminution la plus forte des capacités installées nucléaires. L'augmentation des impacts correspond aux productions des cycles combinés au gaz, des turbines à combustion de la pointe et de l'import qui sont mobilisés lors des intermittences de production renouvelable.

La même figure est élaborée avec les résultats issus du modèle du système électrique (Figure 4.19). Les valeurs d'émission de GES sont bien plus élevées que celles fournies par RTE avec notamment une multiplication de l'ordre d'un facteur 2 des impacts sur les scénarios du BP 2017. Néanmoins, baser la comparaison sur les valeurs absolues des émissions de GES est peu pertinent car il est peu probable que les hypothèses considérées dans ces calculs soient les mêmes que RTE, par exemple dans le choix des données d'inventaire et des méthodes de caractérisation. L'analyse du classement des scénarios montre une bonne similitude : Volt, Ampère, Hertz et Watt dans l'ordre croissant des

impacts. Toutefois, au sein d'un même scénario les tendances sont différentes avec une augmentation de l'intensité carbone du mix au cours du temps dans Ampère et Volt alors qu'elle diminuait dans les données de RTE. Le scénario Watt est celui qui présente le profil d'évolution le plus similaire aux résultats de RTE. Sur les mix électriques de court terme, la tendance est similaire avec toutefois un écart notable sur l'année 2021.

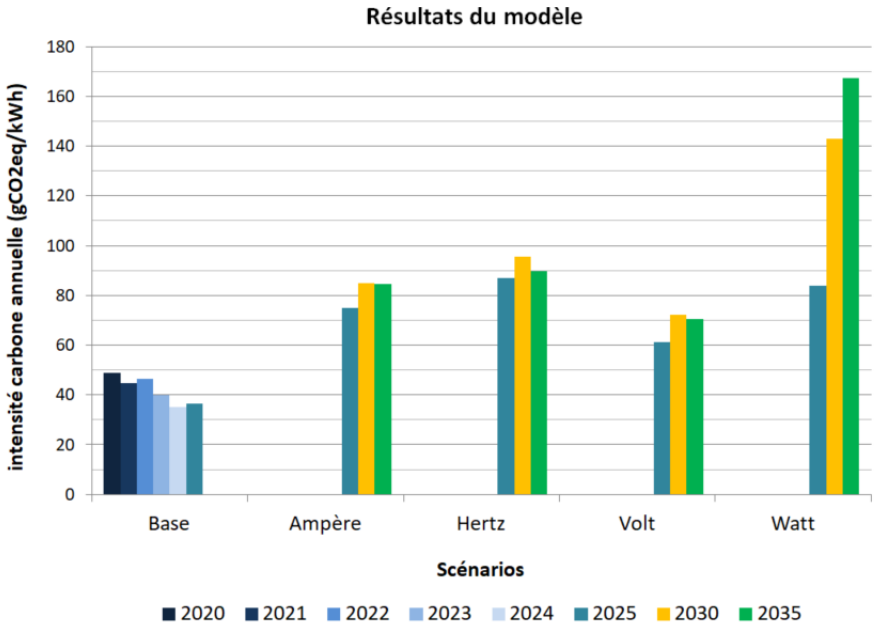


Figure 4.19 - Moyenne annuelle de l'émission de GES des scénarios d'après les résultats du modèle du système électrique

Une analyse des mix mensuels de ces années types permet d'identifier les possibles causes de ces différences (Figure 4.20, Figure 4.21 et Figure 4.22). Une des causes des écarts constatés est la tendance du modèle à avoir, par rapport à RTE, davantage recours aux technologies de pointe en été et aux imports en hiver. Elle est particulièrement forte dans les scénarios Ampère, Hertz (Figure 4.21) et Watt (Figure 4.22) en raison d'une plus faible production nucléaire et d'une plus forte production renouvelable qui induit des intermittences. Le scénario Volt, qui est celui avec le plus haut taux de production nucléaire, comprend le moins de production de pointe et d'import et la plus faible intensité carbone annuelle. Par ailleurs, le recours aux technologies de production au gaz (cycles

combinés) est relativement important dans le scénario Watt ce qui contribue à l'intensité carbone la plus élevée de ses mix.

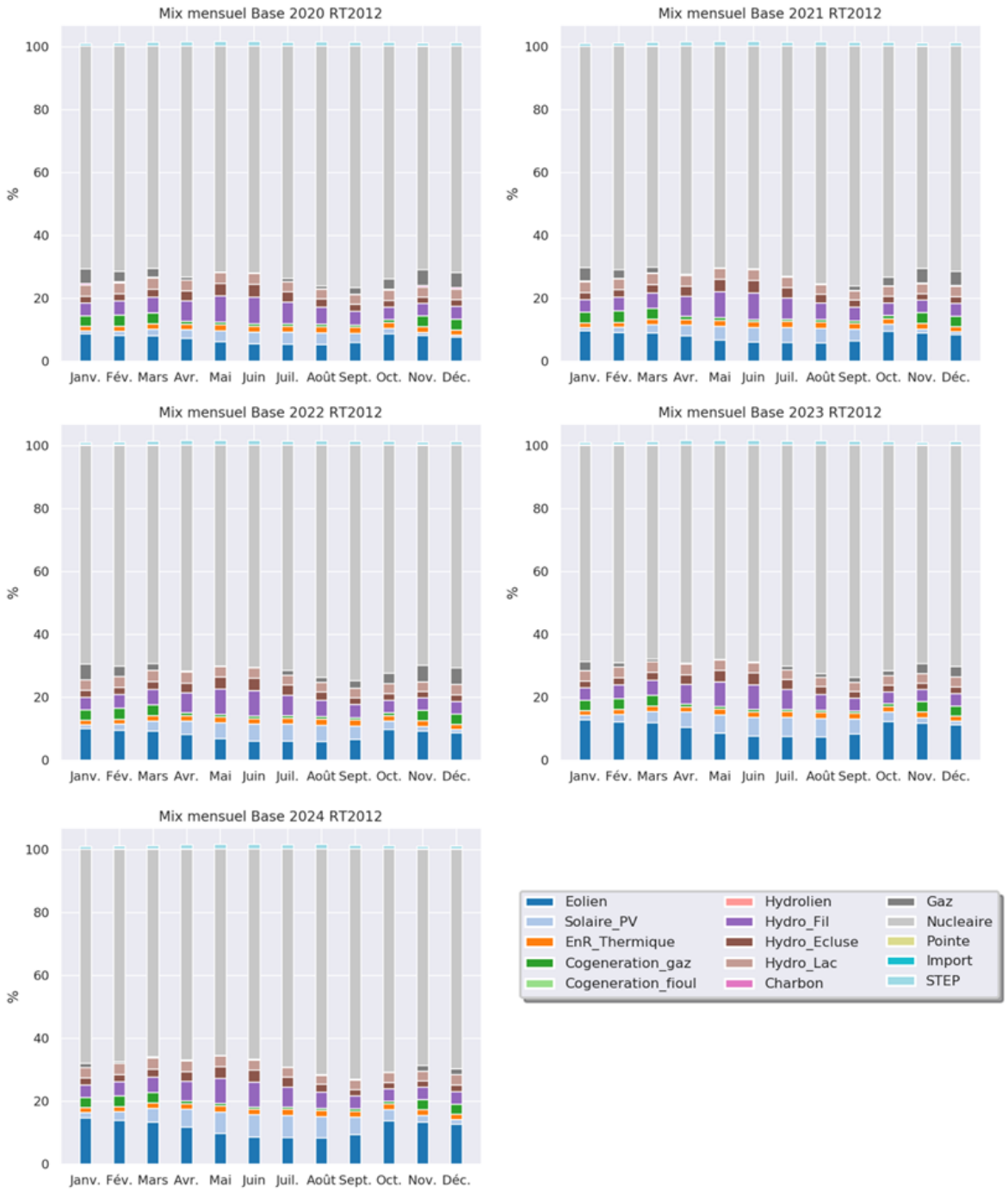


Figure 4.20 – Mix mensuels des scénarios de court terme issus du modèle

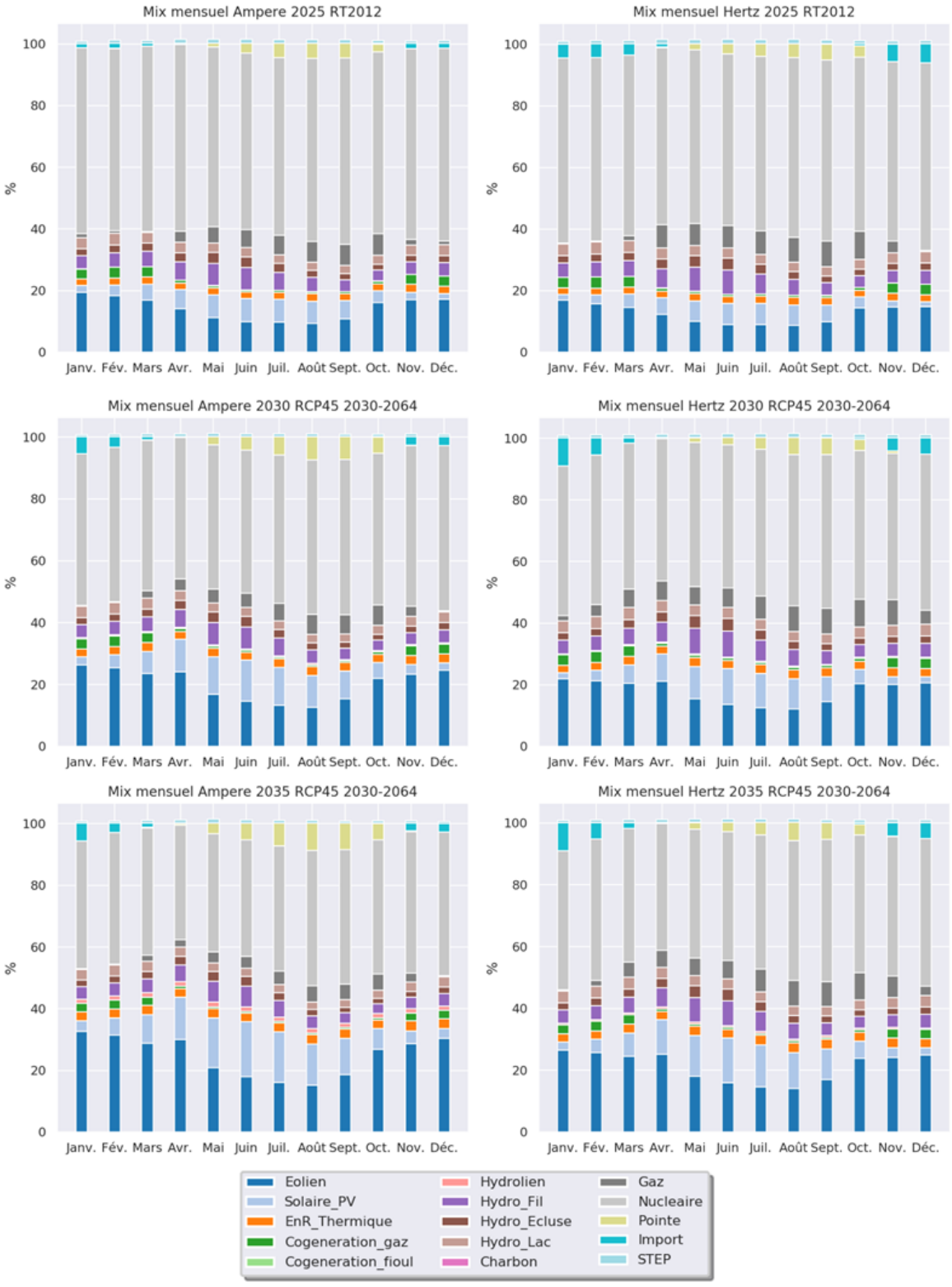


Figure 4.21 – Mix mensuels des scénarios Ampère et Hertz issus du modèle

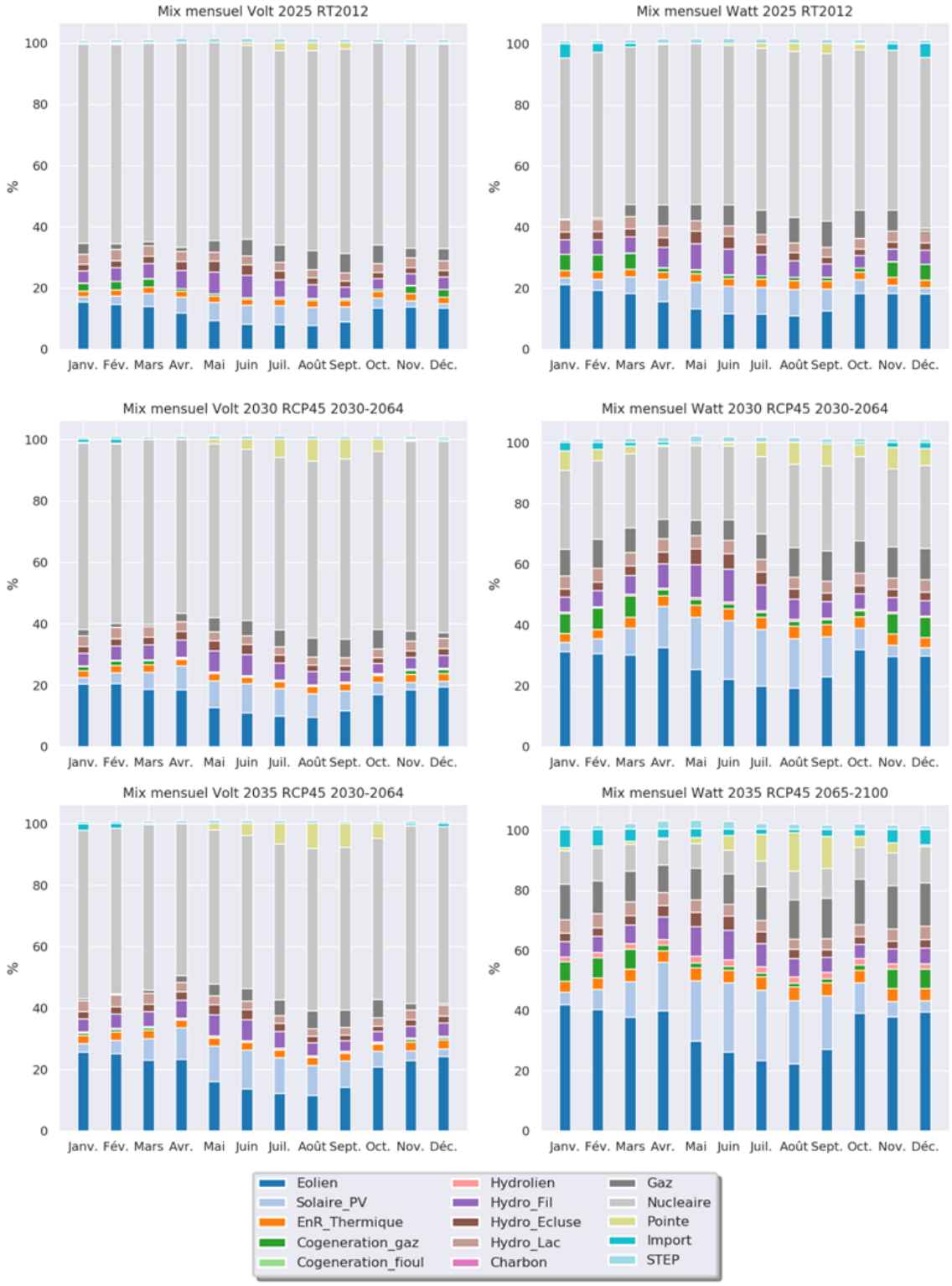


Figure 4.22 – Mix mensuels des scénarios Volt et Watt issus du modèle

Des cartes de chaleur des mix de l'année 2020 et de l'année 2035 permettent d'analyser l'influence de ces évolutions sur la saisonnalité de l'intensité carbone horaire. La représentation de l'année 2020 à la Figure 4.23 montre que l'impact en émission de GES du kWh d'électricité du réseau est le plus élevé durant toute la période hivernale, de début novembre à fin mars. Le reste de l'année, l'intensité carbone du mix est plus faible que sa moyenne annuelle. Cette tendance est directement liée à la thermosensibilité du mix électrique en hiver où des technologies de pointes doivent produire pour répondre à la forte demande de chauffage.

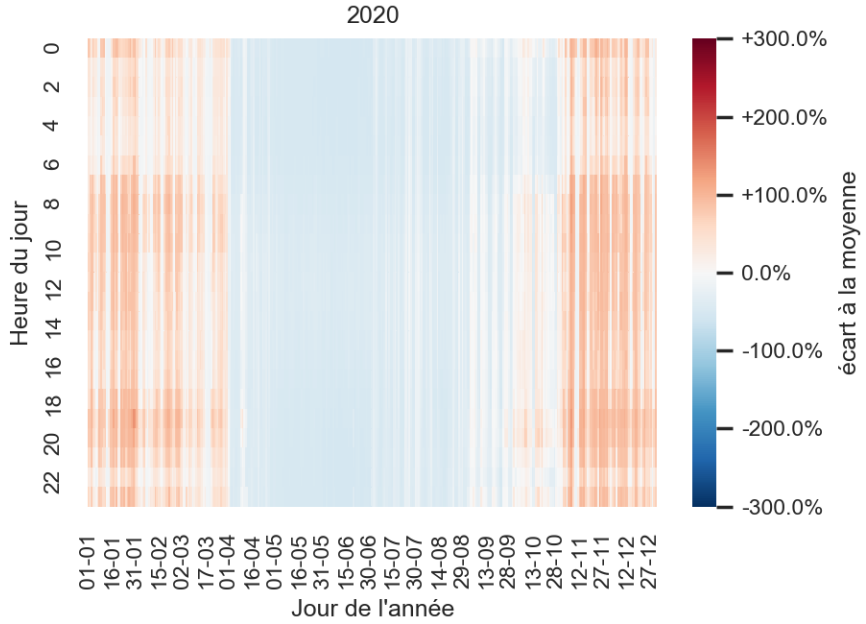


Figure 4.23 – Carte de chaleur de l'écart à la moyenne annuelle de l'intensité carbone d'un kWh d'électricité pour l'année 2020

Les scénarios de RTE générés par le modèle pour l'année 2035 (Figure 4.24 et Figure 4.25) montrent des tendances sensiblement différentes que celle de l'année 2020. Ampère, Hertz et Volt partagent un profil similaire qui comporte des impacts les plus élevés de 17h à 9h pendant la période de mai à fin octobre qui sont corrélées à la moindre capacité de production du nucléaire en général, à la moindre disponibilité éolienne et à la production de pointe durant l'été, ainsi qu'à la disponibilité quotidienne du solaire PV. En mi-journée et le reste de l'année, l'impact du kWh d'électricité est plus faible que la moyenne annuelle.

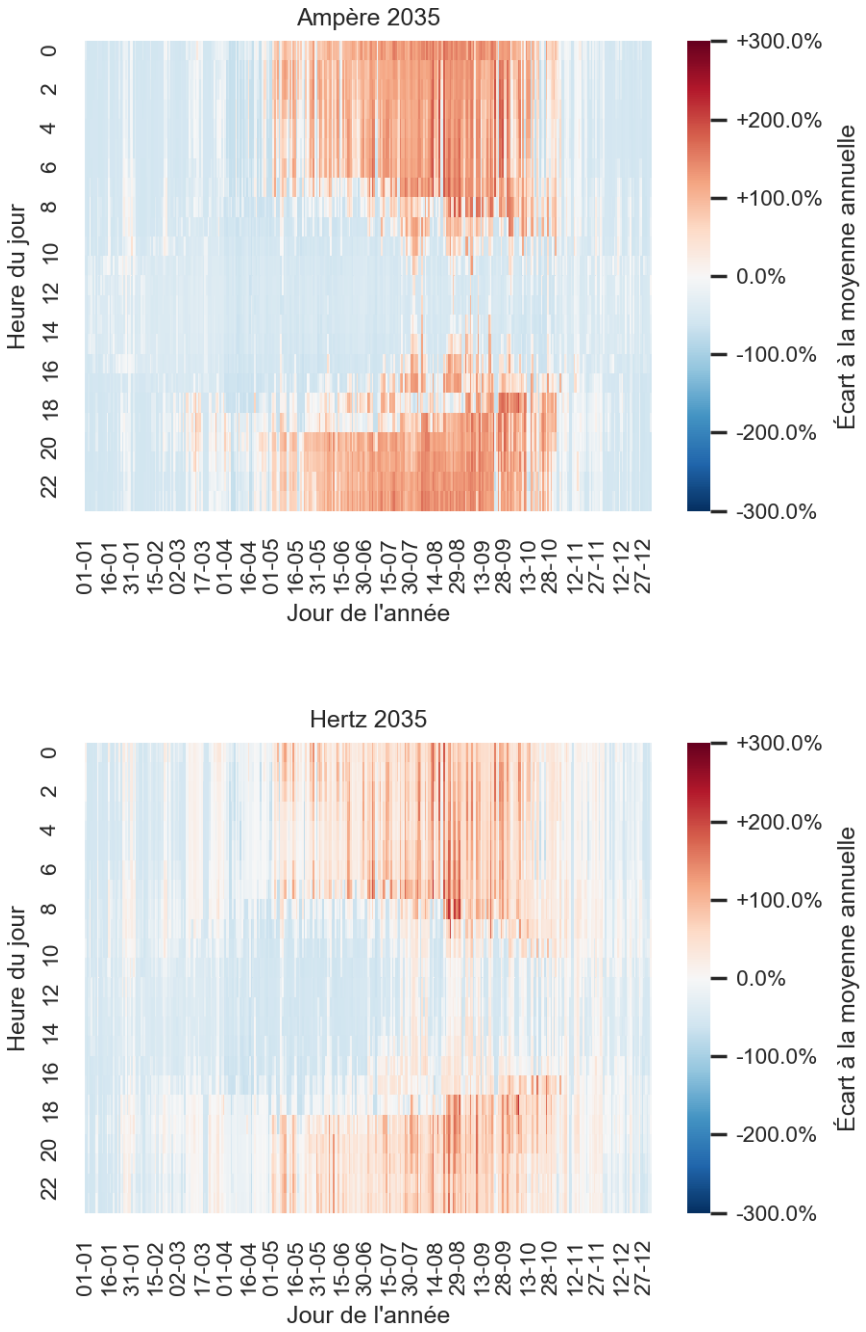


Figure 4.24 – Carte de chaleur de l'écart à la moyenne annuelle de l'intensité carbone d'un kWh d'électricité pour l'année 2035 et les scénarios Ampère et Hertz

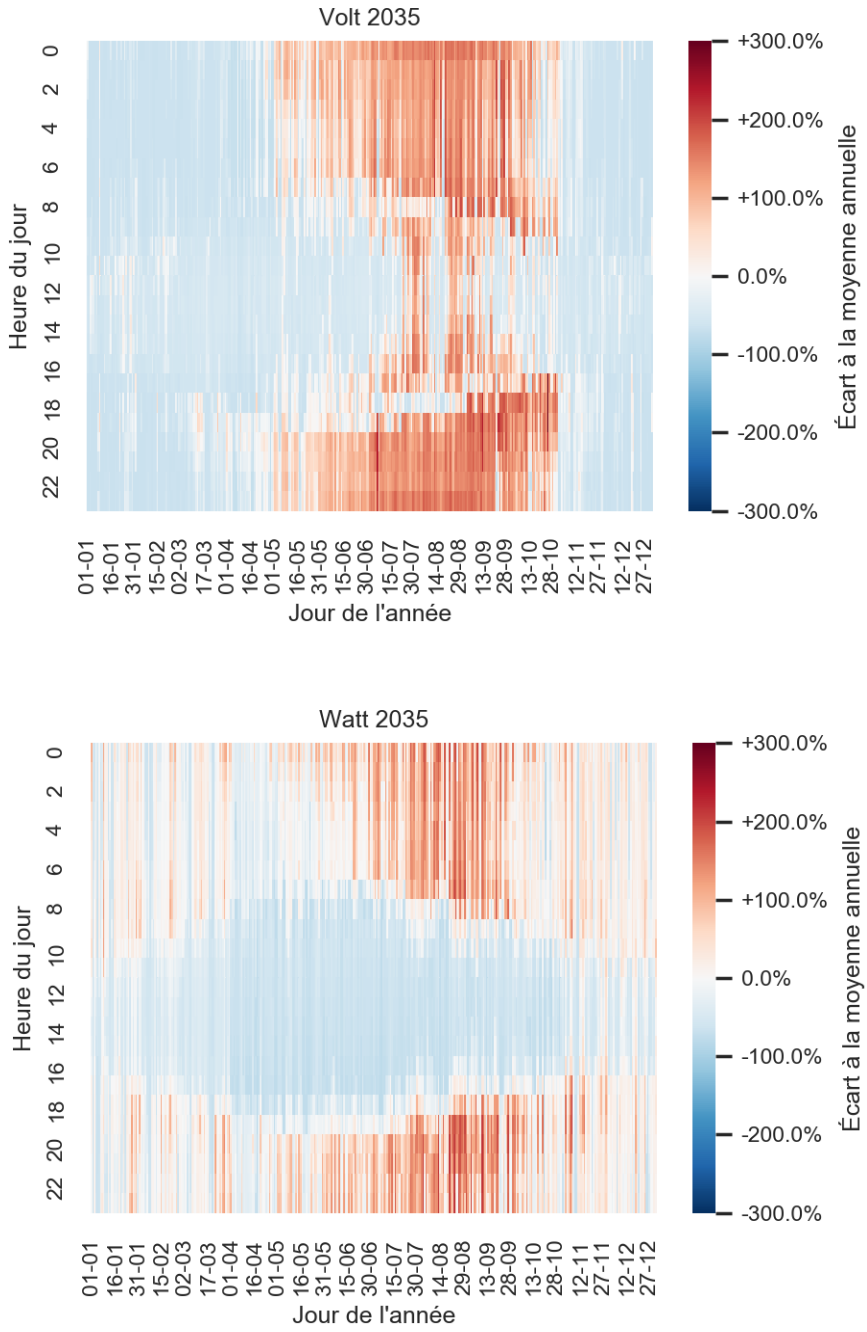


Figure 4.25 – Carte de chaleur de l'écart à la moyenne annuelle de l'intensité carbone d'un kWh d'électricité pour l'année 2035 et les scénarios Volt et Watt

Le cas du scénario Watt est particulier puisqu'il présente des pics tout au long de l'année et durant les heures sans ensoleillement pendant lesquelles il n'y a pas de production d'électricité solaire PV. Ces tendances sont similaires à celles observées par Kiss et al. (2020) dans leur étude d'un scénario de mix électrique décarboné en Hongrie pour l'année 2050, où les heures nocturnes de l'été sont parmi les plus impactantes. Par ailleurs, deux pics particulièrement importants se dessinent début août et fin août en particulier dans le scénario Volt. Ces pics sont corrélés aux deux pics annuels de température du scénario climatique RCP 4.5 utilisé dans la génération des mix prospectifs. Ils montrent une thermosensibilité estivale de mix liée à la plus forte demande de climatisation durant ces heures les plus chaudes. Enfin, une observation concerne la dispersion de l'intensité carbone du mix durant l'année, qui augmente par rapport à 2020 dans tous les scénarios. L'écart-type de l'émission de GES d'un kWh d'électricité en 2020 est 22,9 gCO_2/kWh. Il augmente en 2035 et vaut entre 43 gCO_2/kWh dans le scénario Hertz et 100 gCO_2/kWh dans le scénario Watt.

4.3.4 Limites

Plusieurs limites résident dans la génération de ces mix électriques et sont sources d'incertitude. La principale limite provient du modèle du système électrique qui n'a pas été développé initialement pour un usage prospectif. Bien que plusieurs paramètres d'entrée du modèle correspondent à des hypothèses prospectives (l'impact de la production d'électricité PV, les mix d'import futurs, les capacités installées), la plupart des mécanismes du modèle n'ont pas été adaptés à ces nouveaux contextes. Ils concernent entre autres:

- **L'import/export.** Les échanges avec les pays voisins seront très probablement influencés par les nouvelles interconnexions et par le développement des énergies renouvelables. Les productions d'énergies renouvelables sont elles-mêmes influencées par la variabilité naturelle et les changements climatiques avec des conséquences sur les échanges avec les pays voisins. La modélisation actuelle des échanges est basée sur un réseau de neurones construit sur des paramètres annuels de capacités installées et de soldes d'échanges. Une modélisation des interactions à l'échelle infra-annuelle est

nécessaire pour mieux rendre compte des conséquences des intermittences sur les interactions à l'échelle européenne.

- **La thermosensibilité de la demande nationale.** La part thermosensible de la demande nationale va probablement évoluer dans le temps avec la diminution des besoins de chauffage en hiver et l'augmentation des besoins de climatisation en été.
- **La modélisation de la production éolienne en mer.** La production de l'éolien marin est actuellement calculée avec les mêmes données de vent que l'éolien terrestre. Le vent en mer est plus important avec des fluctuations différentes de celles du vent terrestre. L'usage de données adaptées pourrait modifier les taux d'intermittence de la production éolienne globale.
- **Les hypothèses sur les technologies de production modulables.** La production des technologies modulables est modélisée à travers une boucle d'optimisation qui cherche à minimiser le coût de fonctionnement du réseau. Les changements futurs dans les coûts de fonctionnement de chaque technologie peut modifier leur ordre de priorité aussi appelé *merit order*, voire remettre en cause les hypothèses de base du modèle à mesure que la production renouvelable augmente.
- **Le productible hydraulique.** La production d'électricité des technologies hydrauliques est basée sur des données de productible qui dépendent de réserves d'eau. Ces réserves peuvent fluctuer avec le réchauffement climatique et affecter le productible hydraulique.

L'autre grande limite provient de la source des données prospectives. Il existe d'autres travaux prospectifs qui proposent des scénarios d'évolution du système électrique national aux horizons 2030 à 2050 comme le scénario négaWatt (Association négaWatt, 2018) et le scénario Énergie Climat de l'Ademe (Combet et al., 2017). Les scénarios de RTE ont été choisis en raison de l'adéquation de leurs hypothèses avec le fonctionnement du modèle du système électrique, ce qui a permis de générer des mix électriques prospectifs horaires. Les résultats obtenus sont fortement dépendants des hypothèses et des modèles sous-jacents utilisés par RTE. La prise en compte de scénarios prospectifs issus de différentes sources permettrait de couvrir un ensemble plus large d'incertitudes et donnerait une image plus

complète des futurs possibles. De plus, les résultats concernant le scénario Watt, combinant une sortie du nucléaire et un fort développement des énergies renouvelables, devraient être comparés aux résultats d'autres scénarios similaires pour les mettre en perspective.

4.4 Scénarios de cycle de vie du bâtiment

4.4.1 Scénarios de cycle de vie du bâtiment

Les différents scénarios sont créés à titre d'exemple, afin d'illustrer la démarche d'optimisation robuste. Les cycles de vie du bâtiment sont construits sous la forme de trajectoires temporelles caractérisées par 3 périodes principales :

- **la période court terme de 2020 à 2029 :** elle est caractérisée par un climat unique issu des données de la RT 2012. Les données de mix électrique suivent une trajectoire commune de 2020 à 2024 puis les mix annuels de l'horizon 2025 des 4 scénarios Ampère, Hertz, Volt et Watt sont utilisés de 2025 à 2029 ;
- **la période moyen-terme de 2030 à 2064 :** les deux trajectoires climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 sont explorées. Les données de mix annuels de l'horizon 2030 des 4 scénarios de mix sont appliquées de 2030 à 2034, puis les données des mix annuels de 2035 sont appliquées de 2035 à 2064 ;
- **la période de long terme :** les deux trajectoires climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 basculent sur la dernière période de référence. Les mix électriques annuels de 2035 des 4 scénarios de mix sont toujours appliqués.

Un scénario de climatisation des occupants est activé ou non à partir de la période de moyen terme jusqu'à la fin de vie du bâtiment, formant deux trajectoires alternatives : une « pessimiste » avec l'usage de climatisation durant 70 ans, et une « optimiste » sans aucun usage de climatisation. Ce scénario est exploré en ajoutant un système de climatisation d'une puissance de 1,8 kW et d'une durée de vie de 25 ans. Ce système possède les mêmes données d'inventaire par unité fonctionnelle que la pompe à chaleur et émet des fuites de fluide frigorigène. Il s'agit d'une approximation de la réalité où la PAC initiale pourrait être remplacée par une PAC réversible.

Chaque année du cycle de vie, l'efficacité des panneaux solaires PV se dégrade à cause du vieillissement. Jordan et Kurtz (2013), dans une synthèse de la littérature sur la dégradation des performances des systèmes solaires PV, identifient un taux de dégradation médian de la production des systèmes solaires PV de type poly-Si de -0,6 %/an.

Dans la méthode d'ACV prospective du bâtiment, deux scénarios sont adoptés pour refléter des vieillissements différents : l'un plutôt lent avec un taux de dégradation de -0,4 %/an, et l'autre plutôt rapide avec un taux de dégradation de -0,8 %/an. La performance annuelle du système solaire PV en prenant en compte ces scénarios de dégradation est présentée à la Figure 4.26. Après 30 ans d'utilisation, la performance du système diminue à 89 % avec un taux de dégradation de -0,4 %/an et à 79 % avec le taux de dégradation de -0,8 %/an. La performance réelle moyenne sur 30 ans d'un système solaire PV se situe entre 94 % et 89 % de sa performance initiale en prenant en compte les dégradations, avec des conséquences sur le bilan énergétique d'un bâtiment zéro-énergie.

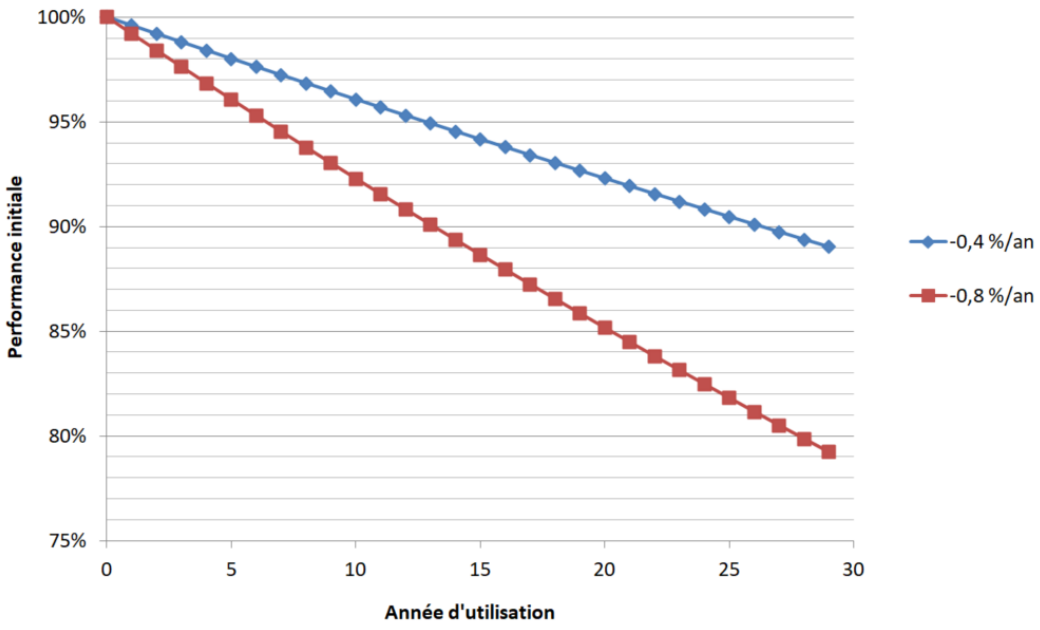


Figure 4.26 – Évolution de la performance d'un système solaire PV par rapport à sa performance initiale avec deux taux de dégradation annuelle

La combinaison des scénarios sur ces quatre aspects prospectifs est illustrée sous forme chronologique et comparé à l'approche usuelle de l'ACV de bâtiment à la Figure 4.27. L'ensemble des combinaisons possibles comprend 32 scénarios de cycle de vie du bâtiment qui décrivent à la fois une dynamique infra-annuelle et une dynamique inter-annuelle.

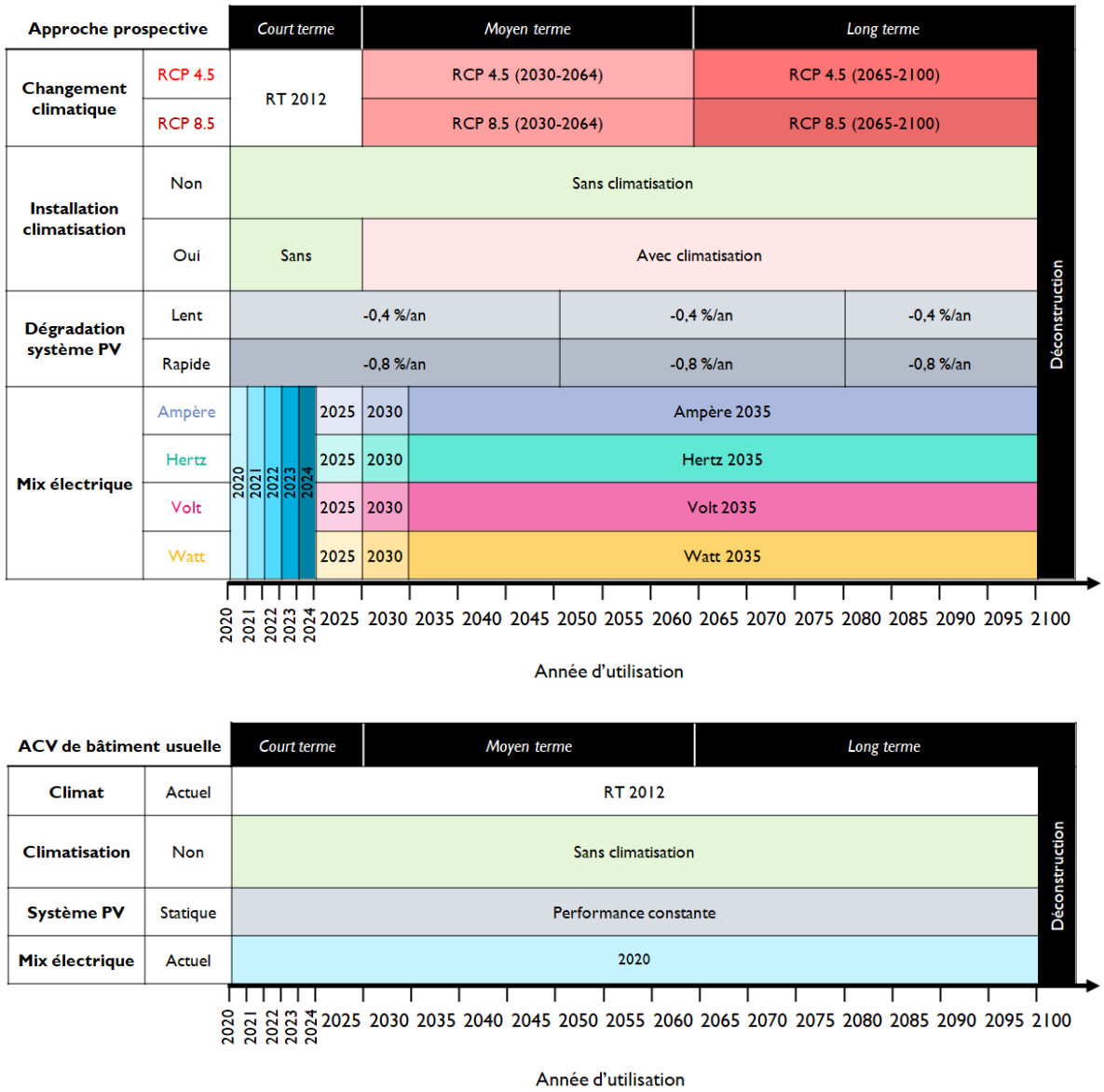


Figure 4.27 – Illustration des scénarios de cycle de vie de l'approche prospective et comparaison avec l'approche usuelle de l'ACV de bâtiment

4.4.2 Implémentation pour l'optimisation multicritère robuste

L'implémentation informatique consiste à calculer les grandeurs d'intérêt d'une solution sur chaque année individuelle possible, puis à assembler de manière cohérente ces années pour former les différentes trajectoires de cycles de vie du bâtiment. Les étapes de calcul sont illustrées à la Figure 4.28. Les SED d'une conception de bâtiment sont réalisées pour chaque scénario et période climatique avec l'hypothèse de la climatisation installée. Dans l'étape 2, les résultats de consommation énergétique peuvent être traités et triés par poste (chauffage, ECS, spécifiques…) ce qui permet d'évaluer les deux scénarios « avec » et « sans climatisation » à partir d'un seul calcul de SED. Cette simplification est possible dans le cas d'une implémentation en optimisation multicritère robuste car la SED avec climatisation va engendrer une consommation de froid durant la période estivale et influencer le confort thermique des occupants. L'influence de la température intérieure sur les autres postes d'énergie est négligeable tandis que le confort des occupants n'est pas une grandeur d'intérêt qui va diriger l'optimisation multicritère robuste. Cette simplification n'est pas possible dans deux cas : dans une ACV robuste *a posteriori* où le confort doit être analysé, et dans le cas d'un problème d'optimisation multicritère robuste qui contient une fonction objectif ou une contrainte sur le confort des occupants.

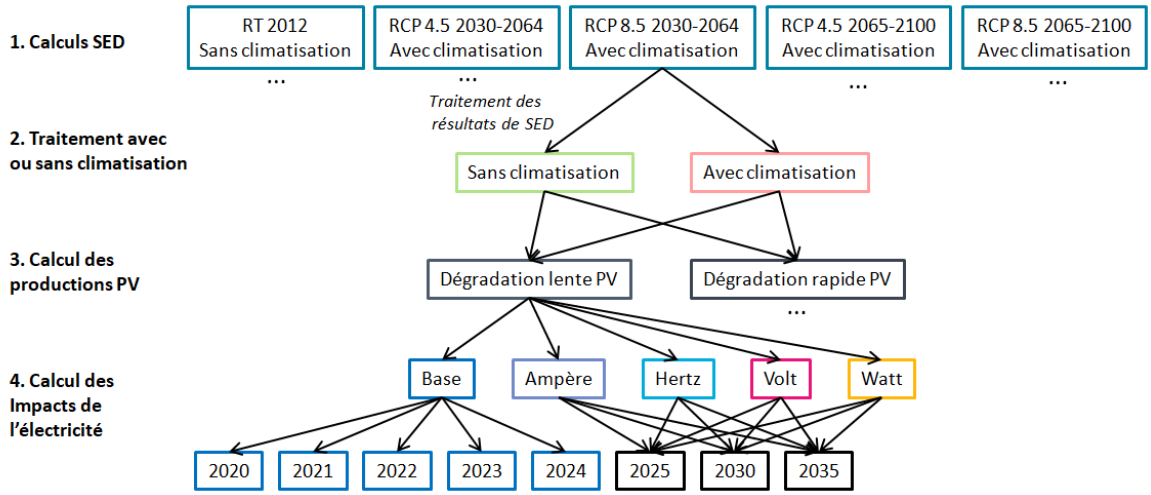


Figure 4.28 – Étapes et répartitions des calculs des années individuelles prospectives en optimisation multicritère robuste

Dans l'étape 3 des calculs, la production d'électricité PV et le bilan d'énergie annuel sont évalués dans chaque contexte climatique, d'usage de climatisation et de dégradation de la performance du système solaire PV. Finalement, dans l'étape 4, les impacts environnementaux sont calculés pour chaque bilan énergétique annuel et chaque scénario de mix électrique.

Cette approche multiplie par 32 le nombre de cycles de vie de bâtiment évalués tout en multipliant les temps de calcul seulement par un facteur 5 par rapport à une approche usuelle de l'ACV du bâtiment. Le paramètre le plus limitant dans les coûts calculatoires est le nombre de périodes et de scénarios climatiques considérés. Toutes les autres opérations associées aux scénarios de climatisation, de dégradation du système PV et des impacts de l'électricité ont un coût calculatoire négligeable.

Conclusion du chapitre 4

Ce chapitre a présenté la méthode prospective d'ACV dynamique du bâtiment qui est basée sur l'exploration de scénarios prospectifs de cycles de vie. Quatre aspects incertains sont explorés : les évolutions du climat et du système électrique, le vieillissement du système solaire PV et l'installation d'une climatisation par les occupants. Les évolutions climatiques sont développées à partir d'une méthode de *morphing* appliquée sur les données issues de modèles climatiques régionaux, globaux et des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 du GIEC. Des évolutions futures sont appliquées sur les variables climatiques de la température, du rayonnement et de l'humidité relative permettant d'assurer une certaine cohérence dans les données climatiques. La cohérence entre le climat et le système électrique est également conservée durant la construction de scénarios de mix électrique basés sur les scénarios Ampère, Hertz, Volt et Watt de RTE. Des phénomènes de pointes estivales futures sur le réseau d'électricité sont corrélés aux pics de chaleurs des données climatiques. Toutefois de grandes incertitudes subsistent dans ces scénarios. L'exercice de reproduction des scénarios de RTE avec un autre modèle que le leur a forcément une validité limitée sans un accès complet à leurs données. Bien qu'imparfaits et incertains, ces scénarios sont utilisés à titre d'illustration de la méthodologie.

La production d'électricité du système PV domestique est plus réaliste en prenant en compte deux scénarios de dégradation des performances. Sur le volet de la consommation, la possibilité de l'installation d'une climatisation par les occupants est explorée. L'approche prospective combine une résolution inter-annuelle et infra-annuelle cohérente. Elle permettra une évaluation fine des impacts environnementaux de l'usage d'électricité d'une conception de bâtiment, en particulier sur la période estivale qui sera particulièrement critique dans le futur, tant d'un point de vue sanitaire, qu'énergétique et environnemental. La méthode a un coût calculatoire limité puisqu'elle ne multiplie que par 5 le nombre de calcul de SED pour un total de 32 scénarios de cycles de vie du bâtiment explorés.

Cette approche présente certaines limites qui sont liées aux capacités de calcul disponibles dans une implémentation en optimisation multicritère robuste. Pour un usage de la méthode dans l'évaluation de la robustesse d'un nombre restreint de conceptions de bâtiment, un ensemble plus diversifié de paramètres incertains peuvent être explorés, par exemple les incertitudes durant l'étape de construction (qualité des travaux et des matériaux), le vieillissement des matériaux de construction et d'autres équipements, des incertitudes sur les données d'inventaire et sur les évolutions technologiques. Le cycle de vie du bâtiment pourrait également être décrit avec un plus grand nombre de sous-périodes, notamment en ce qui concerne le mix électrique dont les scénarios de 2035 sont employés jusqu'en 2100. Une méthode hybride de Monte-Carlo du deuxième ordre mêlant les propagations stochastiques et déterministes des incertitudes pourrait être adoptée pour analyser des incertitudes liées aux variabilités naturelles (de Wilde et al., 2011). Toutes les hypothèses et les scénarios prospectifs employés sont également une source importante de méta-incertitude, notamment en ce qui concerne les modèles climatiques utilisés pour générer les données climatiques futures ou le choix des études prospectives sur lesquelles se basent les scénarios de mix électrique. L'approche décrite dans ce chapitre considère des procédés moyens, ce qui correspond à une approche d'ACV attributionnelle. Une approche conséquentielle considérant des procédés marginaux complèterait utilement cette panoplie de modèles. L'analyse de la méta-incertitude par inter-comparaison d'un ensemble de modèles climatiques et de scénarios prospectifs du système électrique apporterait de la robustesse aux résultats de cette méthode d'ACV prospective.

5 OPTIMISATION MULTICRITÈRE ROBUSTE DE BÂTIMENT ZÉRO-ÉNERGIE

La méthode prospective d'ACV dynamique du bâtiment est utilisée au sein d'une optimisation multicritère robuste appliquée au cas d'étude. La première partie de ce chapitre est consacrée à l'identification de solutions de conceptions qui ont un bilan zéro-énergie robuste. Deux contraintes robustes sont explorées: la moyenne et le quantile du bilan d'énergie finale sur les scénarios de cycle de vie. Dans la seconde partie de ce chapitre, l'optimisation multicritère robuste est appliquée à l'identification de solutions qui ont une émission de GES robuste au regard des incertitudes sur l'étape d'utilisation. Un problème d'optimisation multicritère robuste est calculé selon trois fonctions objectif à minimiser : l'émission de GES totale moyenne sur les scénarios prospectifs, l'écart-type de des émissions de GES prospectives sur l'étape d'utilisation et le coût de construction.

5.1 Robustesse du bilan zéro-énergie

5.1.1 Problèmes d'optimisation robuste

La robustesse du bilan zéro-énergie est étudiée en optimisation multicritère robuste selon deux critères de robustesse qui sont calculés à partir de la distribution des 80 années de cycle de vie fois les 8 scénarios incertains présentés dans le Chapitre 4 qui influencent le bilan énergétique. Au total 640 années possibles (avec un taux de doublon de 3 %) sont utilisées pour calculer les grandeurs d'intérêt robustes suivantes :

- La moyenne du bilan d'énergie finale, noté $\bar{E}_f$. Il s'agit du bilan BEPOS annuel moyen dans l'ensemble de tous les bilan BEPOS annuels prospectifs possibles.
- Le quantile à 90 % du bilan d'énergie finale, noté E_f^{90}. Pour qu'une solution soit valide au regard de la contrainte basée sur le quantile à 90 %, elle doit avoir un bilan BEPOS annuel dans au moins 90 % des 640 années prospectives possibles. Cette contrainte est la plus exigente et assure que le bâtiment reste d'un niveau BEPOS tout au long de sa durée de vie.

Deux problèmes d'optimisation robustes sont définis sur la base des problèmes d'optimisation multicritère précédents en appliquant la contrainte zéro-énergie aux grandeurs d'intérêt robustes du bilan d'énergie finale. Les deux problèmes d'optimisation multicritère robuste (POMR) sont décrits dans le Tableau 5.1 (moyenne) et le Tableau 5.2 (quantile).

Les fonctions objectif des deux POMR restent les mêmes que dans les POM précédents afin d'analyser l'influence de la contrainte zéro-énergie robuste seule. L'émission de GES calculée de manière usuelle en ACV avec les mêmes hypothèses de calcul que précédemment. Les cycles de vie prospectifs sont seulement appliqués au calcul de bilans zéro-énergie robustes. Les deux POMR sont résolus sur 30 générations afin de réduire les temps de calculs tout en conservant un niveau de convergence satisfaisant. La durée d'une optimisation multicritère robuste est de 36 heures.

Tableau 5.1 – Description du POMR avec contrainte zéro-énergie sur le bilan d'énergie finale moyen

Nom du problème	POMR ZE-M		
Nb. individus	200	Taux de croisement	0,9
Nb. générations	30	Taux de mutation	0,15
Échantillonnage	Sobol	Espace de décision	Complet
Fonctions objectif	$\begin{cases}\min f_1(x) = GES_{tot}(x) \\ \min f_2(x) = C_{const}(x)\end{cases}$	Contrainte	$\bar{E}_f(x) > 0$

Tableau 5.2 – Description du POMR avec contrainte zéro-énergie sur le bilan d'énergie finale moyen

Nom du problème	POMR ZE-Q		
Nb. individus	200	Taux de croisement	0,9
Nb. générations	30	Taux de mutation	0,15
Échantillonnage	Sobol	Espace de décision	Complet
Fonctions objectif	$\begin{cases}\min f_1(x) = GES_{tot}(x) \\ \min f_2(x) = C_{const}(x)\end{cases}$	Contrainte	$E_f^{90\%}(x) > 0$

5.1.2 Résultats

Les fronts de Pareto globaux des deux POMR et du POM non robuste équivalent sont comparés à la Figure 5.1. Les fronts de Pareto comprennent 89 solutions pour le POM, 64 solutions dans le POMR ZE-M et 19 solutions dans le POMR ZE-Q. La robustesse de la contrainte zéro-énergie diminue le nombre de solutions non-dominées notamment dans le cas de la contrainte basée sur le quantile à 90 %, qui ne possède pas de solutions dans l'espace le moins cher économiquement (le plus à gauche) en comparaison aux autres problèmes. Les fronts des problèmes robustes sont légèrement dominés par le front du POM usuel qui a été calculé avec 40 générations au lieu de 30. La comparaison de l'évolution de l'hypervolume de ces problèmes est présentée à la Figure 5.2. Elle montre

que la domination du front du POM usuel est présente à chaque génération, elle ne s'expliquerait donc pas par la différence du nombre de générations mais par la définition même des POMR.

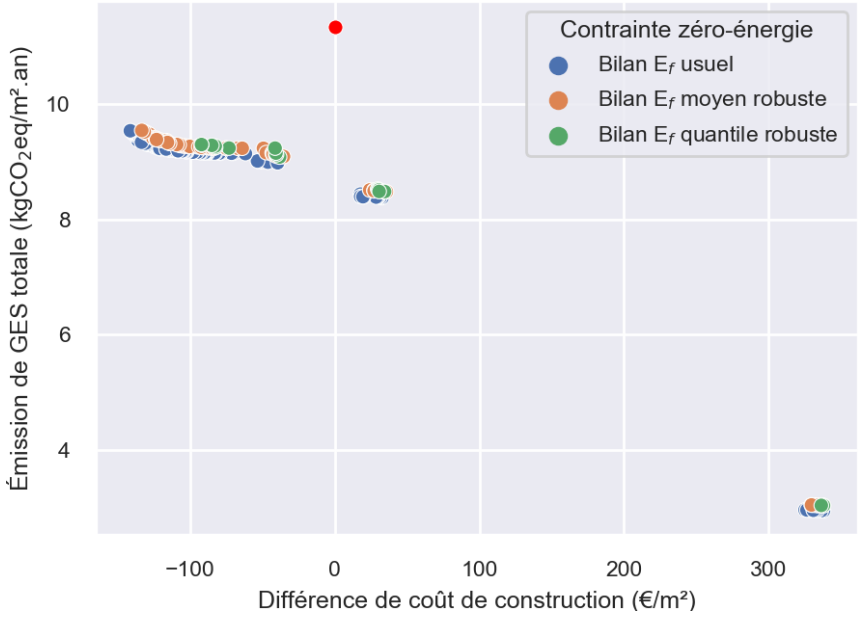


Figure 5.1 – Fronts de Pareto de POM/POMR avec différentes contraintes zéro-énergie

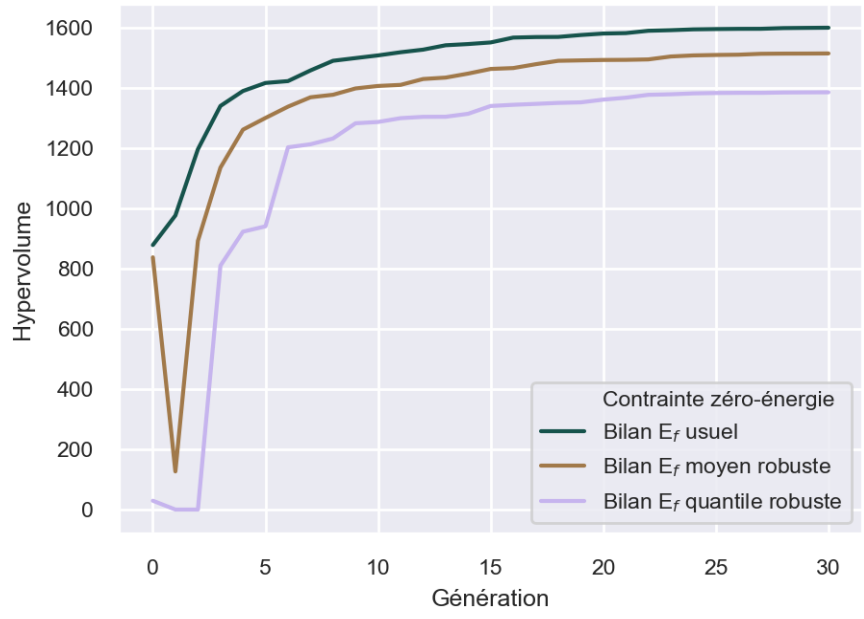


Figure 5.2 – Hypervolumes des POM/POMR avec différentes contraintes zéro-énergie

Les besoins de chauffage, la production d'électricité PV et le bilan d'énergie finale calculés pour la première année d'utilisation d'une conception dans l'approche de cycles de vie prospectifs en ACV robuste, correspondent à ces grandeurs d'intérêt calculées dans une approche usuelle de la SED et de l'ACV. Les valeurs de ces grandeurs pour les trois fronts de Pareto sont comparées à la Figure 5.3. L'application d'une contrainte zéro-énergie basée sur un critère de robustesse a pour effet principal de relever le niveau minimum et la moyenne de la production d'électricité PV parmi les solutions par rapport au POM usuel. Dans le cas du bilan zéro-énergie moyen robuste, la production d'électricité PV minimale est de 39 kWh/m².an ; elle correspond à une surface de panneaux solaires PV de 56,5 m². La production d'électricité PV minimale augmente davantage dans le cas de la contrainte basée sur le quantile à 90 % avec une valeur de 46 kWh/m².an, ce qui correspond à une surface minimale de panneaux solaires PV de 64,9 m². Pour comparaison, les solutions du POM usuel présentent un minimum de production d'électricité PV de 35 kWh/m².an soit une surface de panneaux solaires PV de 51,6 m². En ce qui concerne les besoins de chauffage, les contraintes zéro-énergie robustes ont un effet seulement sur l'espace des solutions les moins chères de la zone 1 du front (béton et fibre de bois). Dans le cas de la contrainte moyenne robuste, les besoins de chauffage maximums des solutions du front sont légèrement plus faibles comparées au front du POM usuel (58 kWh/m².an au lieu de 65 kWh/m².an). L'effet est plus important avec la contrainte basée sur le quantile à 90 % où les besoins de chauffage initiaux des solutions du front ne dépassent pas 33 kWh/m².an, soit une consommation de chauffage de 7,6 kWh/m².an avec la PAC du cas d'étude. Le bilan BEPOS initial minimum est plus élevé afin de respecter les contraintes zéro-énergie robustes : 3,3 kWh/m².an dans le cas de la contrainte robuste sur la moyenne du bilan, et 9,1 kWh/m².an dans le cas de la contrainte robuste sur le quantile.

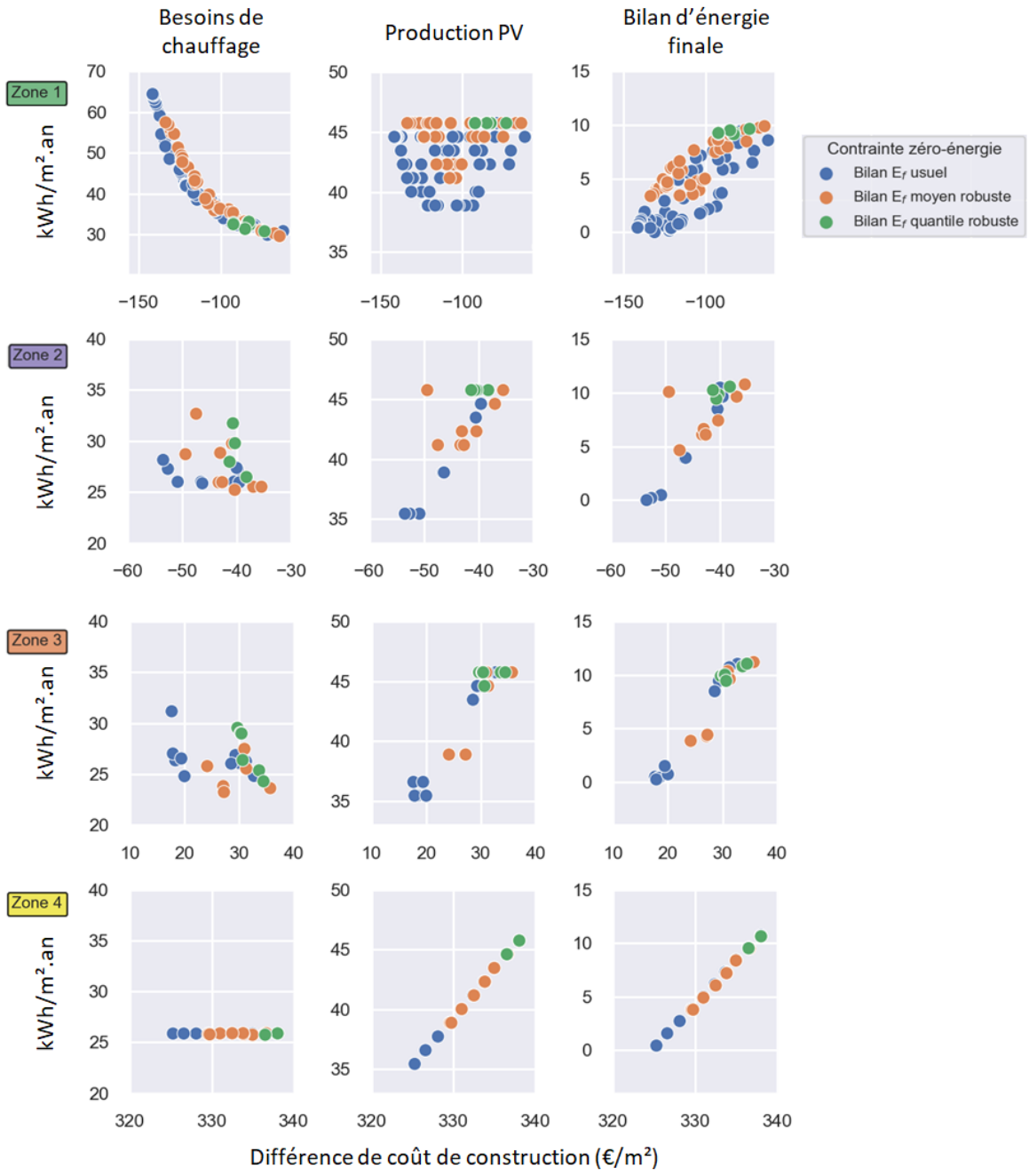


Figure 5.3 – Besoins de chauffage, production d'électricité PV et bilan d'énergie finale de la 1ère année d'utilisation des POM/POMR avec différentes contraintes zéro-énergie. Zone 1 : béton et fibre de bois, zone 2 : béton et laine de roche, zone 3 : béton et laine de verre, zone 4 : ossature bois et paille

5.1.3 Analyse de scénarios

Une analyse de scénarios est appliquée à une solution du front du POMR ZE-Q. La solution sélectionnée pour réaliser l'analyse de scénarios est la « moins robuste des plus robustes » avec 61 cas de non respect du bilan zéro-énergie. Une description de la solution sélectionnée est donnée dans le Tableau 5.3.

Tableau 5.3 – Caractéristiques de la solution du POMR ZE-Q sélectionnée pour l'analyse de scénarios

Type constructif	Besoins de chauffage initiaux (kWh/m².an)	Bilan BEPOS initial (kWh/m².an)	Émission de GES totale usuelle ($kgCO_2eq/m^2.an$)	Différence de coût de construction (€/m²)
B-FDB	32,8	9,2	9,3	-92

Les 8 trajectoires prospectives du bilan d'énergie finale annuel de la solution sont présentées à la Figure 5.4 et montrent la dispersion croissante du bilan BEPOS dans le temps. À court terme (de 2020 à 2029), cette dispersion est relativement faible en raison du non-usage de la climatisation et d'un climat constant. Toutefois, la dégradation des systèmes solaires PV diminue en moyenne le bilan BEPOS initial de près de 18 % au bout de 10 ans d'utilisation. La transition avec la période de moyen terme en 2030 révèle deux aspects qui élargissent la dispersion possible du bilan d'énergie final. En cas de non-installation de la climatisation, le bilan BEPOS peut s'améliorer grâce à la réduction de la consommation de chauffage en hiver induite par les scénarios de réchauffement climatique RCP 4.5 et RCP 8.5 (courbe verte et courbe rose). Dans le cas où une climatisation est installée, la consommation de froid contribue fortement à diminuer le bilan BEPOS. La dispersion du bilan BEPOS en 2030 va de 1,5 à 10,1 kWh/m².an.

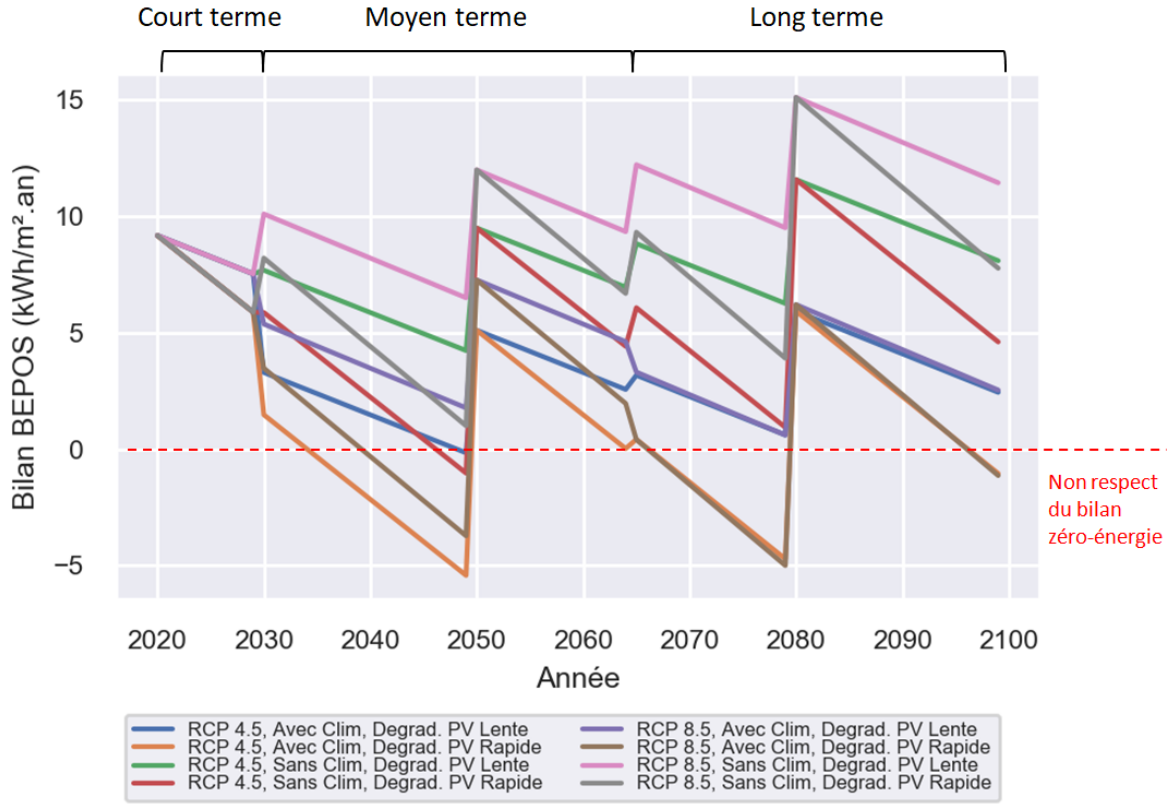


Figure 5.4 – Trajectoires prospectives du bilan d'énergie finale annuel

À l'horizon 2049, dernière année d'utilisation des panneaux solaires PV avant leur premier remplacement, la dispersion du bilan BEPOS s'élargit à cause de l'incertitude sur la dégradation des systèmes solaires PV : elle va de -5 kWh/m².an (importateur sur le réseau) à 6,5 kWh/m².an (exportateur). Sur le long terme, l'écart se creuse entre les bilans d'énergie des scénarios sans climatisation, qui profitent de consommation de chauffage de plus en plus en faible, et les scénarios avec climatisation à cause de consommation de froid de plus en plus élevées.

Les 61 cas de non-respect du bilan zéro-énergie sont analysés statistiquement à la Figure 5.5. Les deux aspects prospectifs les plus influents sur la robustesse du bilan zéro-énergie sont la dégradation du système solaire PV dont le scénario rapide est impliqué dans 98 % des cas de non respect du bilan, et l'usage de climatisation qui est impliquée dans 95 % des cas. La force du changement climatique joue un rôle moindre, le scénario RCP 4.5 est majoritaire avec 57 % des cas de non respect du bilan zéro-énergie. Cela peut

être lié en partie à une consommation de chauffage qui diminue moins que dans le scénario RCP 8.5 étant donné que les seuls cas de non respect du bilan pour lesquels la climatisation n'était pas installée surviennent durant le scénario RCP 4.5. Enfin, la période temporelle n'est pas particulièrement influente, la problématique de la robustesse du bilan zéro-énergie se pose donc déjà à moyen terme, et plus particulièrement dès la 15ème année d'utilisation du bâtiment dans le pire des scénarios.

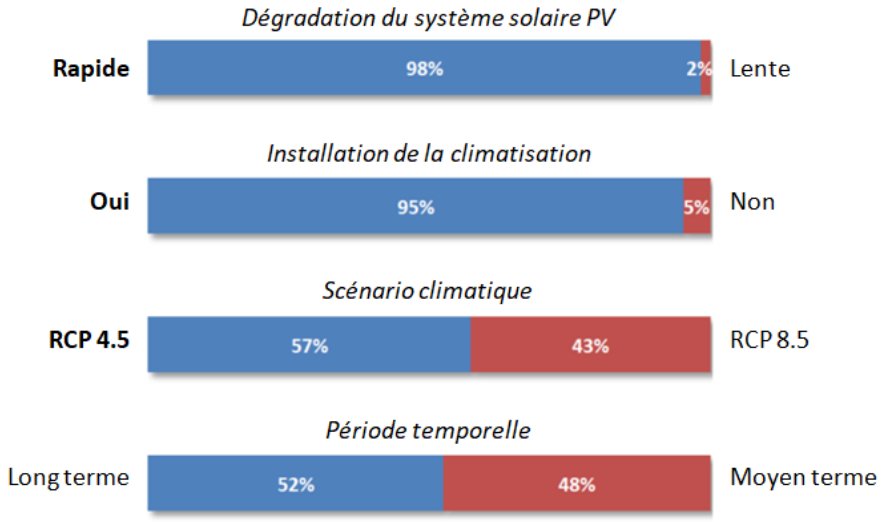


Figure 5.5 – Caractéristiques des cas de non-respect du bilan zéro-énergie

5.1.4 Discussions

Ces problèmes d'optimisation multicritère robuste explorent une première forme de robustesse qui est celle du bilan zéro-énergie/BEPOS du bâtiment. Des deux types de contrainte robuste testées, celle basée sur un quantile à 90 % du bilan d'énergie finale annuel est par définition la plus exigeante et celle qui assure la robustesse la plus durable. Ce quantile n'a pas la signification d'un risque probabiliste mais indique que le bilan zéro-énergie est respecté dans 90 % des situations explorées par les scénarios d'incertitude prospective. Ces résultats présentent toutefois un premier aperçu de la dispersion possible du bilan zéro-énergie dans le temps et montrent en particulier l'influence de la climatisation et du vieillissement du système solaire PV sur sa robustesse. Les solutions identifiées par l'algorithme d'optimisation robuste ont une production d'électricité solaire

PV d'au moins 45 kWh/m².an et des besoins de chauffage qui ne dépassent pas 33 kWh/m².an, ce qui correspond à une consommation de chauffage de 7,6 kWh/m².an grâce aux performances de la PAC du cas d'étude. Le niveau BEPOS initial est d'au moins 9 kWh/m².an pour assurer sa robustesse. Quelques solutions du front du POM usuel partagent les mêmes caractéristiques que les solutions robustes du POMR ZE-Q. L'approche de l'optimisation multicritère sans prise en compte des incertitudes identifie des solutions proches de la robustesse mais ne permet pas au décideur de s'orienter directement vers celles-ci. Toutefois, les solutions usuelles ne sont pas très éloignées des solutions robustes dans l'espace des objectifs, une évaluation de la robustesse du bilan zéro-énergie *a posteriori* pourrait suffire à identifier des solutions usuelles suffisamment robustes. Ces résultats montrent par ailleurs l'importance de l'entretien et du suivi du système solaire PV afin de garantir une faible dégradation de ses performances dans le temps. Une attention particulière devrait être portée sur les conditions estivales futures et les éventuels besoins de rafraîchissement durant la conception.

5.2 Robustesse de l'émission de GES

5.2.1 Définition du POMR

Un problème d'optimisation multicritère robuste est défini afin d'identifier des solutions dont l'émission de GES est minimale et robuste dans le temps. La robustesse de l'émission de GES d'une conception x est évaluée selon la recommandation de Beyer et Sendhoff (2007), à partir de deux critères dont la minimisation est contradictoire :

- la **moyenne des émissions de GES totales sur les 32 cycles de vie prospectifs** présentés au Chapitre 4, notée $\mathrm{E}(\mathrm{GES}_{\mathrm{tot}}^{\mathrm{prosp}}(x))$. Il s'agit d'un objectif de minimisation d'un impact environnemental sur toutes les étapes du cycle de vie du bâtiment, il assure une donc une amélioration globale de la performance environnementale.
- **l'écart-type des émissions de GES sur l'étape d'utilisation sur les 32 cycles de vie prospectifs**, noté $\sigma(\mathrm{GES}_{\mathrm{tot}}^{\mathrm{prosp}}(x))$. Tous les scénarios prospectifs impactent l'étape d'utilisation et engendre une dispersion de ses impacts qui est fortement incertaine. La

minimisation de l'écart-type des émissions de l'étape d'utilisation ajoute un indicateur de robustesse des émissions liées principalement à la consommation du bâtiment.

La prise en compte d'un indicateur de l'émission de GES totale basée sur la moyenne de 32 cycles de vie prospectifs représente déjà un indicateur plus robuste dans le temps que l'émission de GES totale calculée à partir d'un cycle de vie usuel. L'indicateur d'écart-type des émissions de GES prospectives sur l'étape d'utilisation vient compléter cet indicateur global pour orienter la recherche de solutions optimales vers celles qui ont une faible dispersion de leurs émissions au regard des incertitudes sur l'étape d'utilisation. Ce choix est motivé par deux aspects.

Tout d'abord, les résultats des premiers POM du Chapitre 3 ont montré que l'algorithme d'optimisation avait tendance à répondre à l'objectif de minimisation des impacts sur le cycle de vie en minimisant en premier lieu l'isolation de l'enveloppe jusqu'à un minimum « acceptable » du point de vue du POM, mais qui peut ne pas être réaliste. La stratégie proposée était donc, avant tout, une minimisation des impacts de l'étape de construction due à leur part importante dans les impacts totaux, avec une orientation de l'investissement prioritairement dans les systèmes solaires PV qui apportent des bénéfices directs au bilan global du point du point de vue mathématique du problème posé.

Deuxièmement, la minimisation de l'écart-type ne concerne pas les impacts du cycle de vie total car sinon l'algorithme aurait tout à fait « intérêt » à augmenter des impacts de l'étape de construction qui sont fixes pour minimiser l'écart-type global. Il peut en résulter des solutions qui sont certes mieux isolées mais dont l'isolation n'a pas été encouragée par la bonne stratégie. Le véritable intérêt de l'isolation n'est pas de minimiser la dispersion des impacts sur le cycle de vie complet du bâtiment mais bien de minimiser cette dispersion durant l'étape d'utilisation qui est sujette à la majorité des incertitudes prospectives.

La minimisation du coût de construction constitue une troisième fonction objectif. La contrainte du bilan zéro-énergie basée sur le bilan d'énergie finale telle qu'adoptée dans le POM du Chapitre 3 est employée afin d'observer uniquement les effets des objectifs de robustesse. Une description du POMR est donnée dans le Tableau 5.4.

Tableau 5.4 – Description du POMR GES

Nom du problème	POMR GES		
Nb. individus	200	Taux de croisement	0,9
Nb. générations	20	Taux de mutation	0,15
Échantillonnage	Sobol	Espace de décision	Complet
Fonctions objectif	$\begin{cases} \min f_1(x) = \mathrm{E}(\mathrm{GES}_{\mathrm{tot}}^{\mathrm{prosp}}(x)) \\ \min f_2(x) = \sigma(\mathrm{GES}_{\mathrm{util}}^{\mathrm{prosp}}(x)) \\ \min f_3(x) = C_{const}\,(x) \end{cases}$		
Contrainte	$E_f(x) > 0$		

Pour des raisons de temps de calcul, le nombre de générations a été fixé à 20 ce qui ne permet pas d'assurer une convergence globale. Les résultats obtenus pourront tout de même indiquer les tendances fortes de ce POMR.

5.2.2 Analyse du front à trois dimensions dans l'espace des objectifs

Le front de Pareto comprend 257 solutions. Sa représentation en 3 dimensions (3D) est donnée à la Figure 5.6. Cette forme de représentation en 3D permet d'obtenir une vue globale des solutions. Toutefois, sans interaction en temps réel, l'analyse précise des performances des solutions peut être difficile à cause des effets de perspective. Une représentation du front de Pareto selon des paires d'objectifs, donnée à la Figure 5.7, est plus lisible. Elle montre entre 4 et 5 zones d'optimum locaux dans chaque paire d'objectifs étudiée. Des compromis existent entre tous les objectifs. Néanmoins, la minimisation des coûts de construction semble être un objectif encore plus contradictoire avec la minimisation de l'écart-type des émissions de GES, qu'avec l'objectif de minimisation de l'émission de GES totale moyenne.

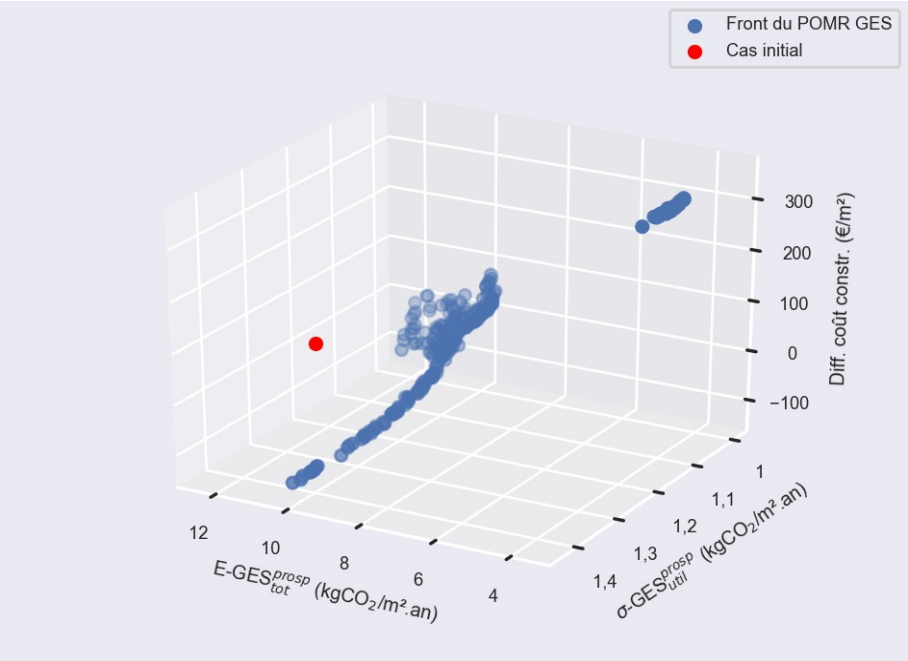


Figure 5.6 – Front de Pareto en 3D du POMR GES

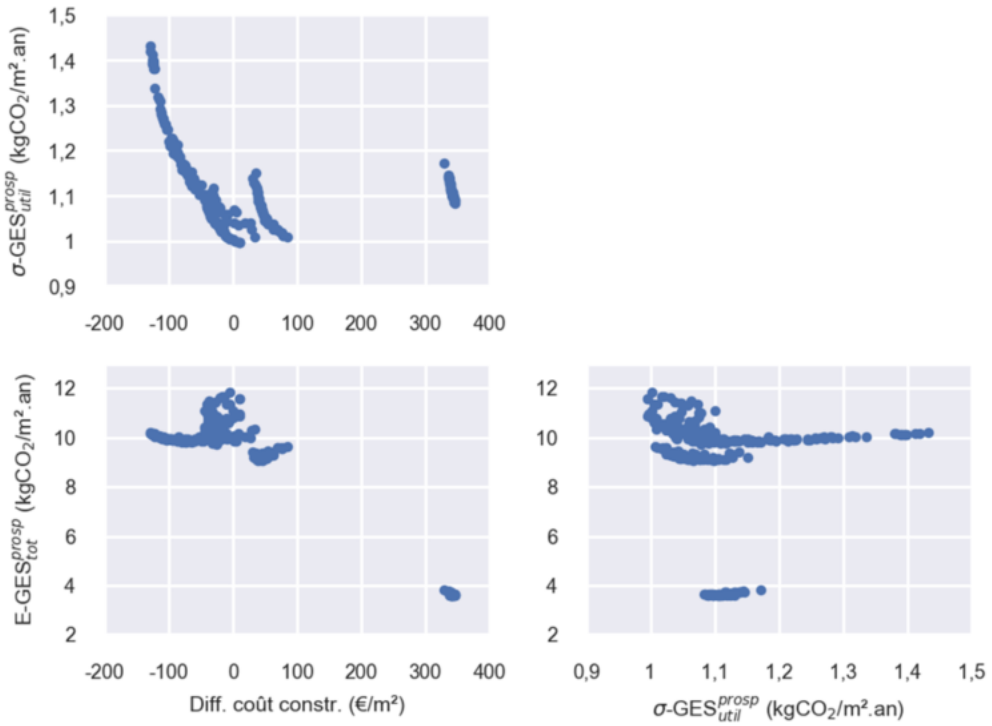


Figure 5.7 – Front de Pareto du POMR GES représenté par paire de fonctions objectif

Une troisième manière de visualiser le front de Pareto consiste à représenter les solutions par un nuage de points selon les deux objectifs puis de représenter les valeurs sur le troisième objectif par un gradient de couleur (Figure 5.8). Cette visualisation n'est pas le front de Pareto selon deux objectifs mais une vue en 2D du front à trois objectifs. Les solutions qui peuvent paraître dominées sur les dimensions représentées par les axes des abscisses et des ordonnés sont bien dominantes selon le troisième objectif représenté par la couleur. Le cas initial est affiché et possède une robustesse de l'émission de GES durant l'utilisation qui est dans la moyenne de celle des solutions optimales de ce POMR. Il existe des améliorations possibles du cas initial selon les trois objectifs en même temps. Par ailleurs, le long de la valeur d'émission de GES totale de 10 $kgCO_2/m^2.an$, on peut constater une évolution de la robustesse avec l'augmentation du coût d'investissement (couleur claire).

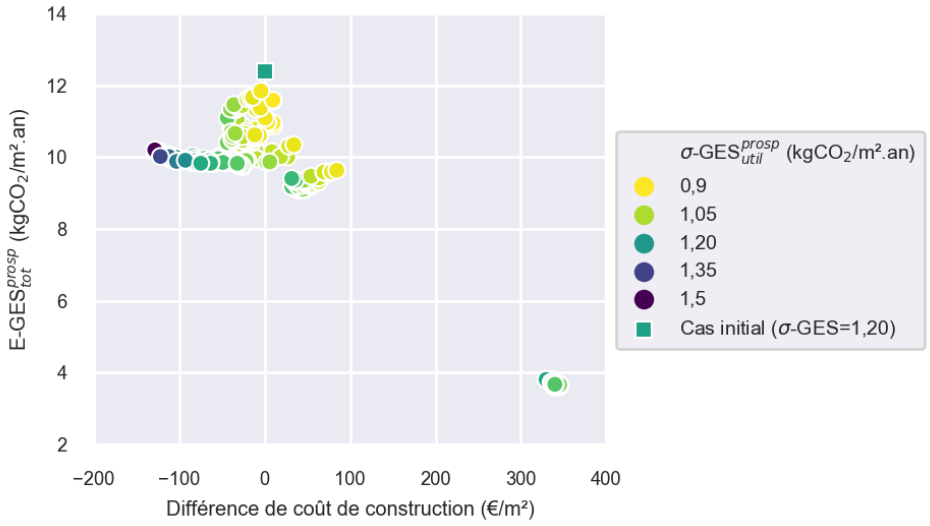


Figure 5.8 – Front de Pareto du POMR GES avec un gradient de couleur sur la valeur d'écart-type de l'émission de GES durant l'utilisation

Afin de faciliter l'analyse du front en zones distinctes, une méthode de *clustering* est employée pour identifier et rassembler les solutions qui partagent des caractéristiques similaires. La méthode du partitionnement en k-moyennes (*k-means clustering*) est utilisée et fait partie des méthodes de *clustering* les plus populaires. Elle repose sur le placement aléatoire de centroïdes dans l'espace qui représentent les positions moyennes de partitions.

Les solutions sont assignées à la partition la plus proche, puis la position du centroïde est mise à jour pour correspondre à la moyenne des solutions qui lui ont été assignées. Une boucle d'optimisation va itérer le rassemblement des points vers la partition la plus proche et la mise à jour du centroïde jusqu'à la convergence. En pratique, la méthode présente l'avantage d'être simple d'utilisation et rapide à calculer. La méthode nécessite de spécifier à l'avance le nombre k de partitions. Son inconvénient principal est la possibilité de converger vers un minimum local à cause du placement aléatoire des premiers centroïdes.

Le partitionnement en k-moyennes est implémenté avec la librairie Python Sci-kit Learn pour l'apprentissage machine[25]. La méthode est appliquée afin d'identifier les groupes à partir de similitudes à la fois sur les performances des trois fonctions objectif, sur les besoins de chauffage initiaux (en tant qu'indicateur du niveau d'isolation du bâtiment) et sur le système constructif. À partir de la première analyse visuelle et d'une analyse succincte des systèmes constructifs des solutions du front, $k = 6$ groupes sont assignés. Les groupes identifiés sont décrits dans le Tableau 5.5 et sont représentés sur le front de Pareto 3D à la Figure 5.9 et sur le front de Pareto visualisé en 2D à la Figure 5.10.

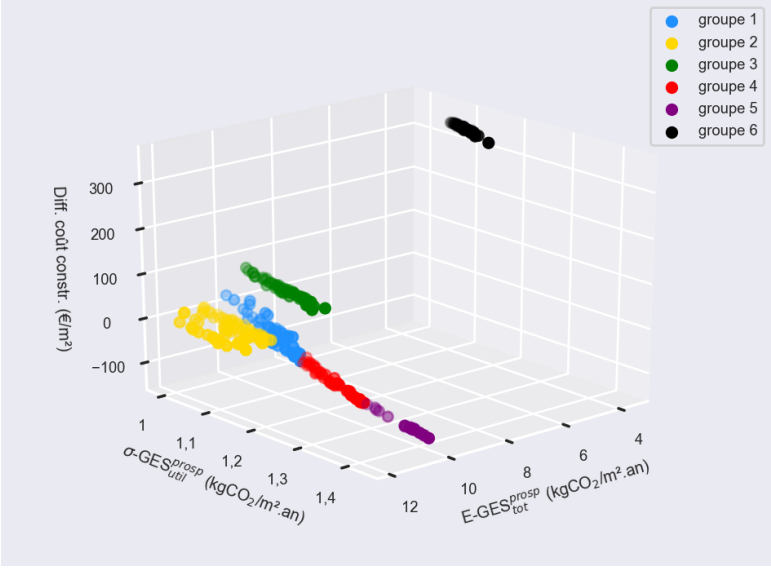


Figure 5.9 – Front de Pareto 3D du POMR GES avec visualisation des groupes

[25] https://scikit-learn.org/

Tableau 5.5 – Description des groupes de solutions du front POMR GES

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5	Groupe 6
Nombre de solutions et syst. constructif	37 B-FDB et 6 B-LDR	71 B-EPS	49 B-LDV	40 B-FDB	16 B-FDB	38 OB-P
Moyenne de $E(GES_{tot}^{prosp}(x))$ (kgCO2eq/m².an)	9,95	10,70	9,30	9,90	10,10	3,70
Moyenne de $\sigma(GES_{util}^{prosp}(x)$ (kgCO2eq/m².an)	1,09	1,04	1,07	1,20	1,37	1,11
Moyenne de la diff. de coût de construction (€/m²)	-30	-24	49	-91	-122	340
Moyenne des besoins chauds (kWh/m².an)	21,4	16,5	18,6	33,8	49,9	23,7

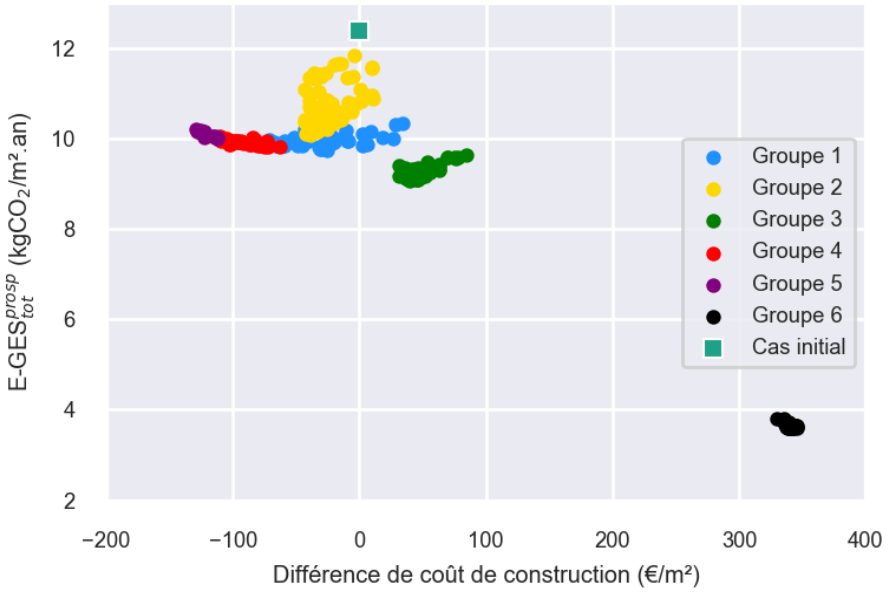


Figure 5.10 – Représentation en 2D du front de Pareto du POMR GES selon la moyenne des

émissions de GES et le coût de construction avec visualisation des groupes

Chaque groupe possède des avantages et des inconvénients relativement aux autres sur chacun des objectifs. Le groupe 5 (violet) comprend les solutions moins chères de toutes avec une différence moyenne de coût de construction de 122€/m² par rapport au cas initial. Il se caractérise par la plus faible robustesse de ses émissions de GES durant l'utilisation (1,37 kgCO_2/m².an) et les besoins de chauffage les plus élevés (49,9 kWh/m².an). Ses solutions se classent parmi les moins bonnes solutions sur l'indicateur des émissions de GES totales moyennes. Il a toutefois un meilleur bilan global que le cas initial. Les groupes 1 et 4 (bleu et rouge) ont des émissions de GES totales similaires. Elles se différencient par un compromis entre le coût de construction et la robustesse : le groupe 4 est moins robuste pour un coût de construction moins élevé que le groupe 1. Le groupe 2 (jaune) correspond aux solutions les plus robustes pour un coût abordable. Elles ont les besoins de chauffage les plus faibles et des émissions de GES totales les plus élevées tout en restant meilleures que le cas initial sur les trois objectifs. Le groupe 3 (vert) correspond à des solutions plus chères que les groupes 1 à 4. Il est le plus performant sur le critère des émissions de GES totales et il est parmi les mieux classés en termes de robustesse. Les besoins de chaleur sont relativement faibles avec 18,6 kWh/m².an. Ce groupe fait donc partie des solutions les plus performantes en termes d'émissions globales et de robustesse aux dépens d'un coût de construction plus élevé que le cas initial. Enfin, le groupe 6 (noir), est le mieux classé sur le critère d'émission de GES total grâce à ses solutions de type OB-P. Il correspond aux coûts de construction les plus élevés du front et possède une bonne robustesse relativement aux autres groupes. Cette analyse montre le réel compromis qui existe entre les trois objectifs ainsi qu'une corrélation forte entre le niveau de robustesse de l'étape d'utilisation et l'isolation de l'enveloppe.

5.2.3 Sélection d'une solution robuste

La sélection de solutions parmi un front à 3 dimensions (3D) peut être compliquée par la présence de plusieurs compromis et un nombre important de solutions possibles. Dans ce POMR l'objectif environnemental principal est l'émission de GES totale du bâtiment sur son cycle de vie tandis que l'objectif de minimisation de l'écart-type peut être considéré

comme un objectif secondaire de sélection. Le choix de solutions pourrait être réduit en obtenant le front à deux dimensions (2D) sur les critères d'émission de GES totale et de coût de construction à partir du front 3D. Le front 2D obtenu après cette opération est représenté à la Figure 5.11. Le front 2D ne contient plus que 20 solutions parmi lesquelles le groupe 2 n'est plus représenté.

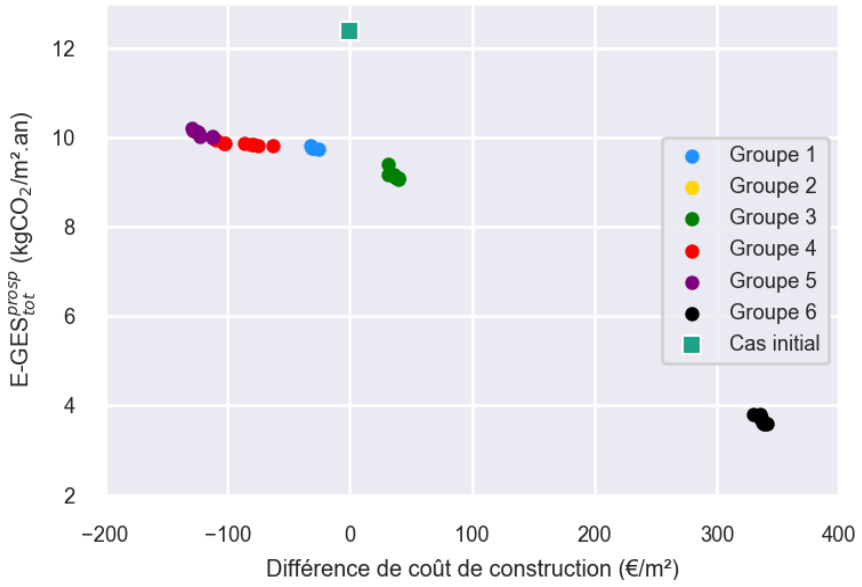


Figure 5.11 – Front à deux dimensions extrait du front de Pareto 3D du POMR GES

Les caractéristiques des solutions de ce front sont données dans le Tableau 5.6. Une comparaison avec les solutions optimales sélectionnées dans le POM Complet du Chapitre 3 est donnée dans le Tableau 5.7 et *via* la visualisation des solutions dans l'espace des objectifs robustes à la Figure 5.12. Les solutions du POM Complet se confondent dans le front de Pareto 2D. C'est parce qu'un front de Pareto sur 2 des 3 objectifs initiaux d'un problème d'optimisation multicritère est équivalent à obtenir le front de Pareto issu du problème d'optimisation sur les deux objectifs choisis.

Tableau 5.6 – Description des solutions du front 2D extrait du front 3D du POMR GES

	Groupe 1	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5	Groupe 6
Nombre de solutions et syst. constructif	1 B-FDB et 3 B-LDR	9 B-LDV	9 B-FDB	9 B-FDB	9 OB-P
Moyenne de E($GES_{tot}^{prosp}(x)$) (kgCO2eq/m².an)	9,77	9,15	9,88	10,10	3,69
Moyenne de σ($GES_{util}^{prosp}(x)$) (kgCO2eq/m².an)	1,10	1,12	1,21	1,37	1,14
Moyenne de la diff. de coût de construction (€/m²)	-32	-30	-90	-123	336
Moyenne des besoins chauds (kWh/m².an)	23,1	23,2	34,6	50,3	24,6
Surface panneaux PV (m²)	66,5	64,3	66,14	66,14	61,5

Tableau 5.7 – Description du cas initial et des solutions des décideurs du POM Complet du Chap. 3 dans l'espace des objectifs du POMR GES

	Cas initial	Solution A	Solution B	Solution C
Système constructif	B-EPS	B-LDR	B-LDV	OB-P
$E(GES_{tot}^{prosp}(x))$ (kgCO2eq/m².an)	12,4	9,89	9,02	3,58
$\sigma(GES_{util}^{prosp}(x)$ (kgCO2eq/m².an)	1,20	1,22	1,12	1,12
Diff. de coût de construction (€/m²)	0	-54	+33	+338
Besoins chauds (kWh/m².an)	10,4	28,3	25,0	25,9
Surface panneaux PV (m²)	33,3	51,6	66,5	66,5

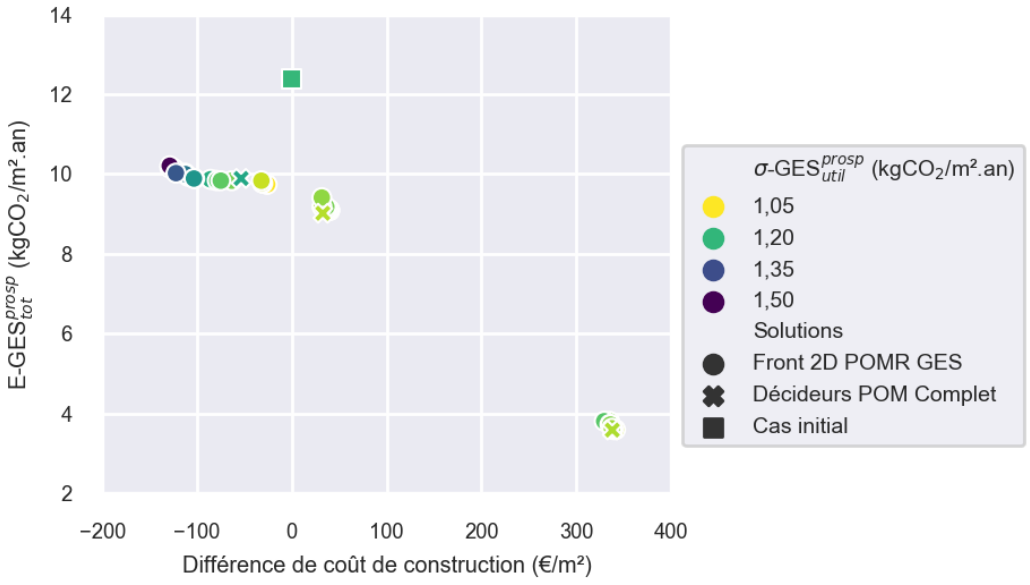


Figure 5.12 – Solutions du front 2D du POMR GES, des décideurs du POM Complet et cas initial dans l'espace des objectifs prospectifs

Le problème de sélection d'une solution robuste doit donc être posé autrement. Les résultats précédents sur le front en 3D du POMR GES ont montré :

- L'augmentation de la robustesse (=diminution de l'écart-type) avec l'investissement pour un niveau de GES donné ;
- La diminution des besoins de chauffage avec l'augmentation de la robustesse.

À bilan environnemental donné, une solution sera plus robuste en augmentant son isolation et donc son coût. Le fait est que les POM usuels du chapitre 3 traitent de manière simplifiée la réalité en ne prenant pas en compte les aspects incertains. Cela engendre une surestimation artificielle de la diminution possible des coûts de construction par rapport aux performances énergétiques réellement atteignables d'un bâtiment. Les solutions présentées aux décideurs devraient être celles qui, à émission de GES totale égale, sont les plus robustes. Cette idée est illustrée en sélectionnant des solutions du front 3D du POMR GES qui sont équivalentes en termes d'émission de GES totale avec les solutions des décideurs. Néanmoins, à cause de la faible convergence du front (20 générations au lieu des 40 du POM Complet), la comparaison est limitée et une seule solution robuste équivalente à la solution du décideur A est identifiée. Ces deux solutions sont affichées à la Figure 5.13.

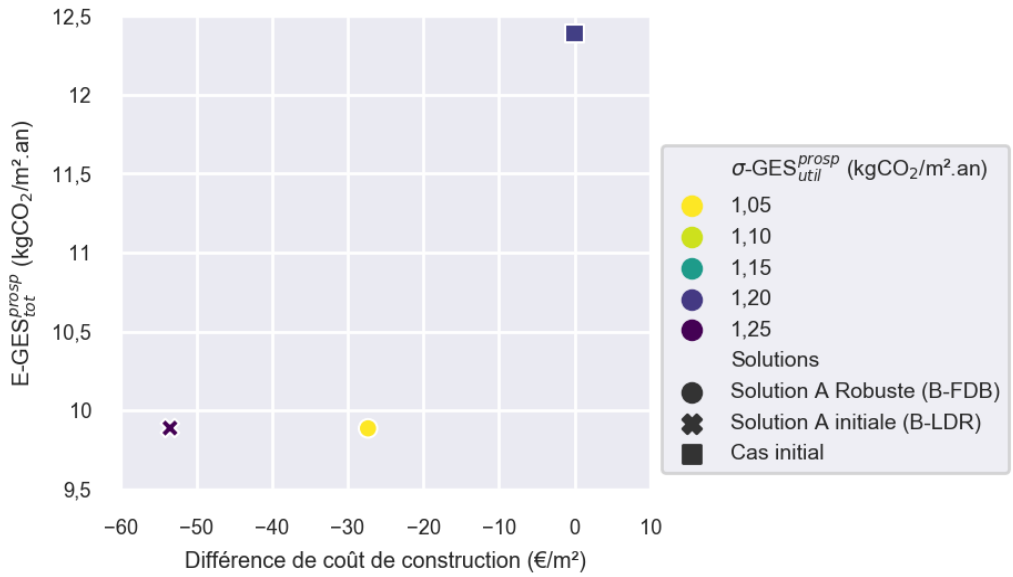


Figure 5.13 – Solution robuste sélectionnée et comparaison avec la solution du POM

Complet du décideur A et avec le cas initial

La version robuste de la solution A (A-R) possède un écart-type de 1,09, soit une amélioration de la robustesse au sens de cet indicateur de 11 %. Son coût est supérieur de 26 €/m², soit 5330 € de différence dans ce cas d'étude. La solution reste tout de même moins coûteuse que le cas initial de 27 €, soit une économie par rapport à celui-ci de 5535 € pour un bilan carbone à la fois meilleur et plus robuste.

Les caractéristiques de ces deux solutions sont comparées dans le Tableau 5.8. La solution A-R a une émission de GES moyenne équivalente à celle de la solution A. La robustesse des émissions de GES de l'étape d'utilisation de la solution A-R se répercute dans une moindre mesure sur la robustesse de l'émission de GES du cycle de vie complet avec un écart-type et un quantile à 90 % sur les scénarios prospectifs qui est plus faible que la solution A initiale. La solution A-R est également caractérisée par des besoins de chauffage plus faibles (-25 %) et une production d'électricité plus élevée (+26 %). Son niveau BEPOS initial est ainsi plus élevé (10,5 kWh/m².an) et plus robuste dans le temps avec un quantile à 90 % de 1,6 kWh/m².an. Enfin, aucune des deux solutions n'a d'heures d'inconfort durant le scénario climatique le plus chaud ce qui peut s'expliquer en partie par la présence d'une casquette à la façade Sud et des taux de surfaces vitrées plus faibles qui atteignent 11 % au Nord, 29,7 % au Sud, et 14,5 % à l'Est dans les deux variantes. De manière similaire au confort thermique, le confort lumineux pourrait être pris en compte : un calcul de facteur de lumière du jour pourrait être mené afin de vérifier que les pièces concernées ne sont pas trop sombres.

Tableau 5.8 – Caractéristiques de la solution A initiale et de la solution A robuste

	Unité	Solution A Initiale	Solution A-R
Différence de coût de construction	€/m²	-54	-27
Moyenne de l'émission de GES prospective totale $E(GES_{tot}^{prosp}(x))$	kgCO2eq/m².an	9,89	9,89
Écart-type de l'émission de GES totale $\sigma(GES_{tot}^{prosp}(x))$	kgCO2eq/m².an	1,14	1,01
Quantile à 90 % de l'émission de GES totale	kgCO2eq/m².an	12,0	11,8
Moyenne de l'émission de GES prospective durant l'utilisation $E(GES_{util}^{prosp}(x))$	kgCO2eq/m².an	1,30	0,57
Écart-type de l'émission de GES prospective durant l'utilisation $\sigma(GES_{util}^{prosp}(x))$	kgCO2eq/m².an	1,22	1,09
Quantile à 90 % de l'émission de GES durant l'utilisation	kgCO2eq/m².an	3,60	2,56
Besoins de chauffage initiaux	kWh/m².an	28,3	21,3
Production d'électricité PV initiale	kWh/m².an	35,4	44,6
Bilan BEPOS initial	kWh/m².an	0	10,5
Moyenne des bilans BEPOS prospectifs	kWh/m².an	-6,8	6,7
Quantile à 90 % des bilans BEPOS prospectifs	kWh/m².an	-8,1	1,6
Nombre d'heures d'inconfort sur le scénario RCP 8.5 2065-2100	heures	0	0

Les paramètres de conception de ces deux solutions sont présentés dans le Tableau 5.9.

Tableau 5.9 – Paramètres de conception de la solution optimale robuste et comparaison avec le cas initial

Conception		Solution A Initiale	Solution A-R
Système constructif		B-LDR	B-FDB
Épaisseur d'isolant (cm)	Combles	12	20
	Mur extérieur	6	35
	Mur ext. combles	0	10
	Mur ext. garage	0	0
	Mur intérieur RDC sur VS	6	9
	Toiture terrasse	8	10
	Plancher sur TP	6	8
	Plancher sur VS	6	9
Surface vitrée	Nord	-30 %	-30 %
	Sud	-30 %	-30 %
	Est	-30 %	-30 %
	Ouest	-30 %	Initiale
Type de vitrage	Nord	Double vitrage	Triple vitrage
	Sud	Double vitrage	Triple vitrage
	Est	Double vitrage	Triple vitrage
	Ouest	Triple vitrage	Double vitrage
Surface panneaux PV (m²)		51,6	64,9

La solution A robuste se distingue d'abord par l'usage d'une isolation en fibre de bois à la place de la laine de roche initiale. Presque toutes les parois de l'enveloppe sont mieux isolées avec notamment une épaisseur de 35 cm dans le mur extérieur au lieu de 6 cm dans la solution A initiale. L'isolation des combles passe également de 12 à 20 cm sur le plancher et de 0 à 10 cm sur le mur extérieur. Le triple vitrage est utilisé sur les façades Nord, Sud et Est alors qu'elles comportaient du double vitrage dans la solution A initiale. La surface de panneaux solaire PV augmente elle aussi pour passer de 51,6 à 64,9 m², et n'atteint toutefois pas le maximum possible sur l'espace de décision. Enfin, le cas de la fenêtre Ouest reste inexplicable. L'installation de double vitrage au lieu du double induit une diminution du coût mais cette logique ne se poursuit pas dans la diminution de la surface vitrée. Étant donné le très faible ratio de surface vitrée liée à cette fenêtre sur la façade Ouest (2 %), les variabilités qui la concernent peuvent sembler négligeables et liées à une convergnce incomplète de l'algorithme.

Les boîtes à moustaches à la Figure 5.14 présentent la distribution des émissions de GES des 640 années prospectives de l'étape d'utilisation. La solution A-R a non une dispersion légèrement moindre et des émissions en moyenne plus faibles sur cette étape.

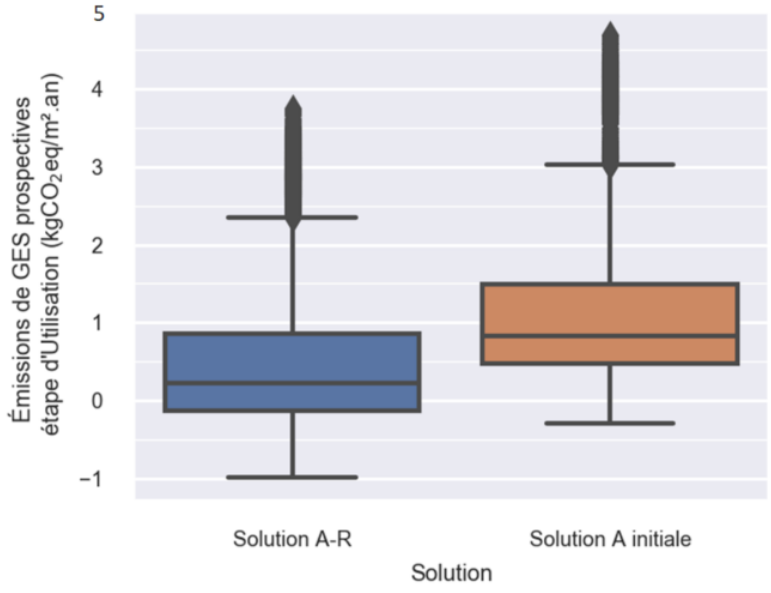


Figure 5.14 – Boîtes à moustaches des émissions de GES des années prospectives de l'étape d'utilisation pour les solutions A-R et A initiale

La distribution des émissions de GES totales prospectives est donnée pour chaque solution à la Figure 5.15. Elle montre des différences globales peu importantes entre les solutions malgré la meilleure robustesse des émissions de la solution A-R sur l'étape d'utilisation. La solution A-R est caractérisée par des émissions légèrement plus faibles dans les pires scénarios prospectifs et sur le quantile à 90 % que la solution A initiale. La distribution des émissions de la solution A-R est plus resserrée. À l'inverse sa valeur médiane est légèrement plus élevée. La définition du POMR a donc eu pour conséquence un déplacement des impacts depuis l'étape d'utilisation vers d'autres étapes du cycle de vie dans les solutions optimales.

De façon générale, l'émission de GES totale a une incertitude importante comme en témoignent les dispersions évaluées entre 8,5 et 12 $kgCO_2/m^2.an$ pour les deux solutions.

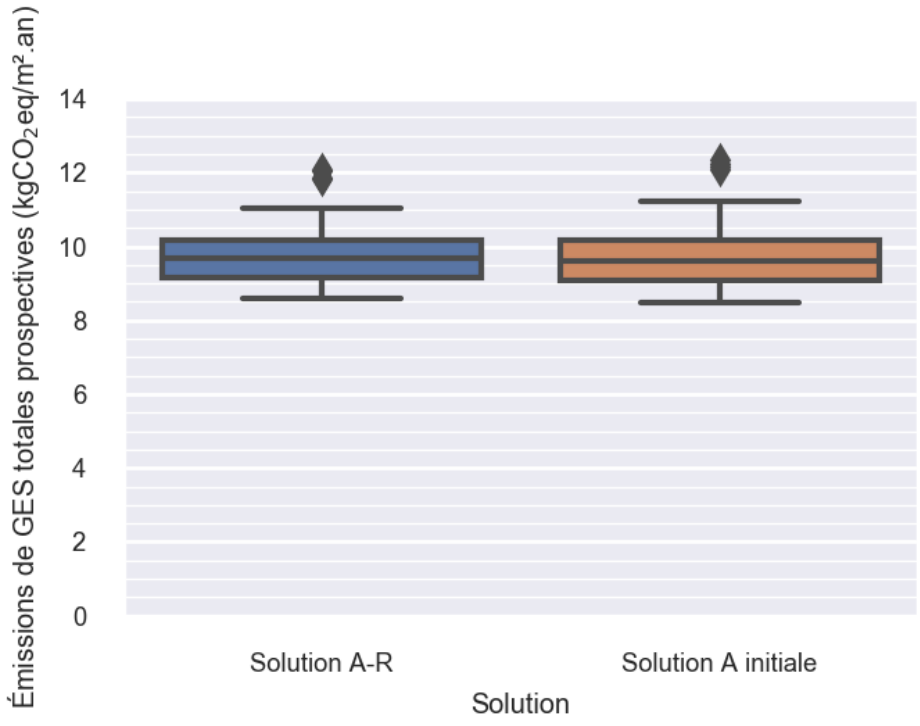


Figure 5.15 – Boîtes à moustache des émissions de GES totales prospectives pour les solutions A-R et A initiale

Une ACV usuelle est appliquée à ces deux solutions dans le but d'identifier les principaux contributeurs (Figure 5.16). Cette ACV n'emploie pas les hypothèses prospectives liées aux consommations d'énergie et aux impacts de l'installation d'une climatisation supplémentaire (fabrication, fuites, démantèlement). Les impacts sur l'étape d'utilisation sont ceux calculés de manière usuelle pour conserver la cohérence de l'évaluation. La solution robuste A-R a des impacts plus faibles à la construction que la solution A initiale grâce à l'usage d'isolants biosourcés en fibre de bois (-19 %). Les impacts sur l'étape de rénovation sont plus élevés à cause de la plus grande surface de panneaux solaires PV (+20 %). La différence d'impact la plus nette se situe dans l'étape de déconstruction où l'incinération des isolants en fibre de bois génère des impacts 14 fois plus élevés sur cette étape que la solution A initiale malgré la valorisation énergétique. Un déplacement des impacts s'est donc produit principalement vers cette étape et non vers l'étape de construction comme cela pourrait être attendu. Par un hasard algorithmique, la solution A-R se trouve être moins impactante à l'étape de construction et plus robuste durant l'étape d'utilisation. Ses impacts de fin de vie sont très importants mais demeurent également incertains étant donné leur horizon temporel lointain.

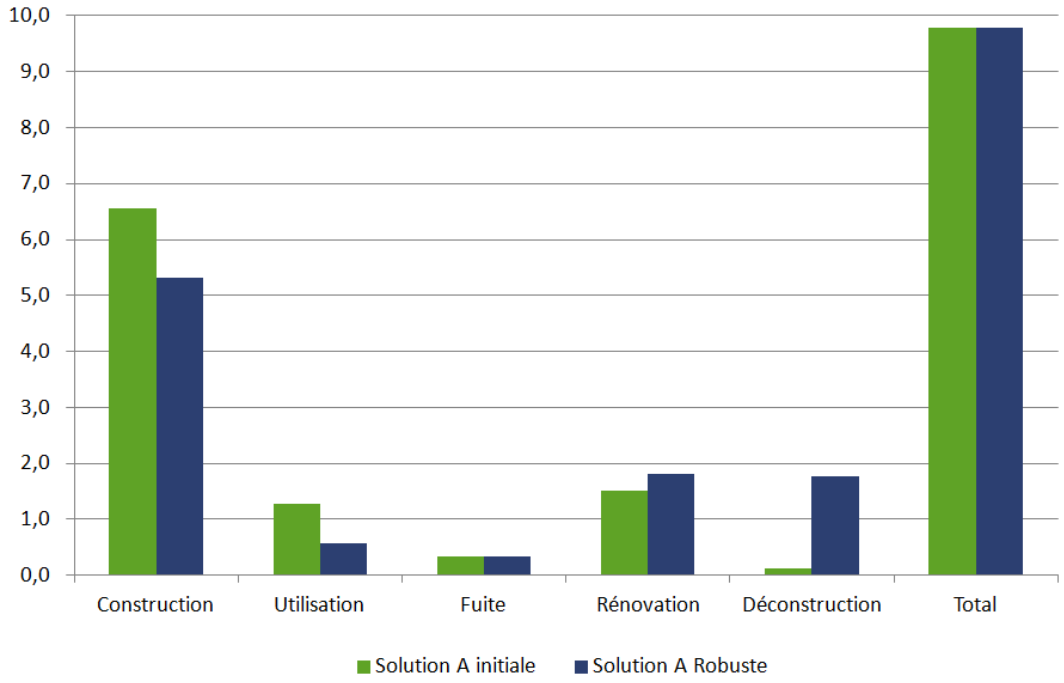


Figure 5.16 – ACV usuelle de la solution A initiale et de la solution AR

Enfin, les autres indicateurs environnementaux de l'ACV usuelle sont calculés pour les deux solutions et présentés à la Figure 5.17. La solution A-R est moins impactante que la solution A sur la consommation d'énergie primaire (-60 %) et la consommation d'eau (-80 %) à cause de son plus faible impact durant l'étape d'utilisation liée à une plus grande production nette d'électricité. En revanche, elle est plus impactante sur l'émission de particules fines (+14 %) et l'acidification (+17 %). Elle est notamment bien plus impactante sur l'occupation des sols (multiplication des impacts par 3,8) à cause de l'usage de l'isolant en fibre de bois et engendre ainsi des dommages plus grands aux écosystèmes (+40 %).

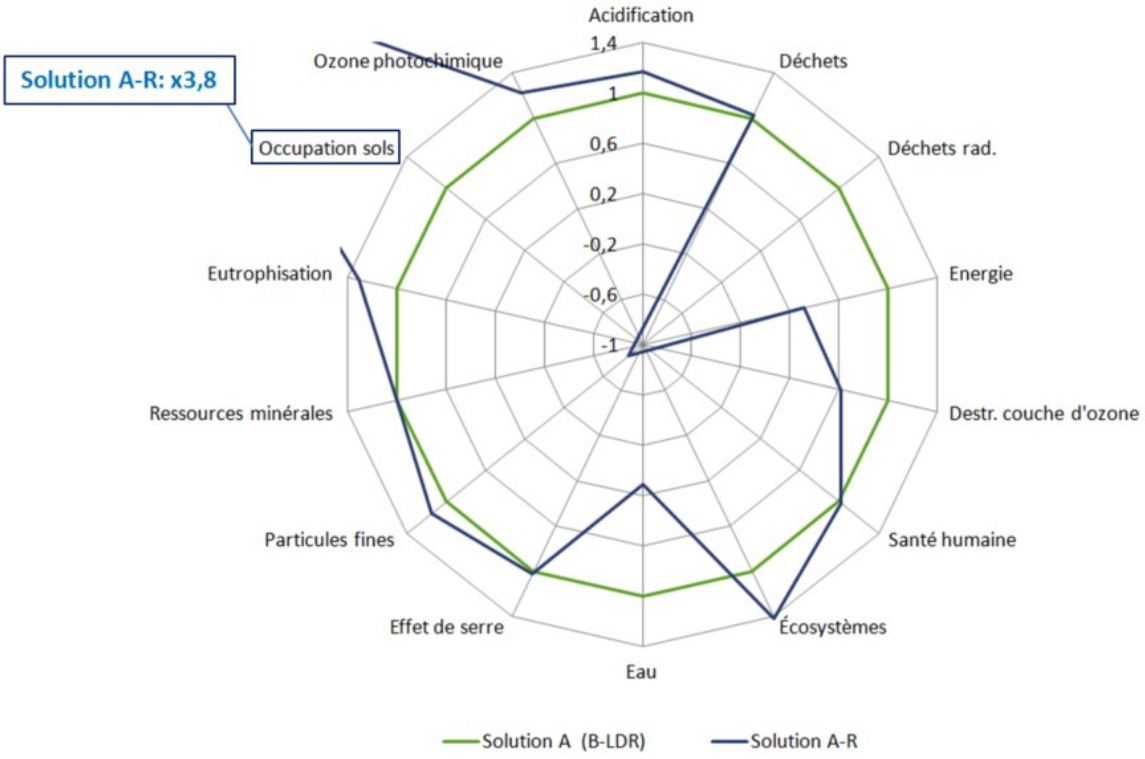


Figure 5.17 – Comparaison des impacts en ACV des solutions A initiale et A-R

Conclusion du chapitre 5

Ce chapitre a permis d'appliquer la méthode prospective d'ACV dynamique par scénarios au sein de deux problèmes d'optimisation multicritère robuste différents.

Le premier problème s'est concentré sur la notion de robustesse du bilan zéro-énergie et a consisté à considérer deux contraintes robustes sur le bilan d'énergie finale : la moyenne et le quantile sur toutes les années prospectives. Les résultats ont montré qu'un bâtiment avec un niveau BEPOS proche de zéro risque de ne plus respecter la contrainte du bilan d'énergie finale après 15 ans le pire scénario à cause de la dégradation des panneaux solaires PV et de l'installation de la climatisation par les occupants. L'usage d'une contrainte zéro-énergie robuste en optimisation multicritère basée sur le quantile des bilans d'énergie prospectifs, permet d'identifier des bâtiments BEPOS qui auront plus de chances de respecter ce bilan tout au long de leur cycle de vie. Ceux-là ont pour principale caractéristique d'avoir les plus grandes surfaces de panneaux solaires PV possibles. L'influence de cette contrainte sur les besoins de chauffage des solutions optimales s'est traduite par la non sélection dans le front de solutions qui ont des besoins supérieurs à 35 kWh/m².an. Elle n'a toutefois pas augmenté la performance thermique globale des solutions du front par rapport aux solutions les plus performantes du POM usuel.

Le second problème a traité de la robustesse des émissions de GES par le prisme de deux fonctions objectif simultanées : la minimisation des émissions de GES totales moyennes sur les scénarios prospectifs, et la minimisation de l'écart-type de l'émission de GES durant les étapes d'utilisation prospectives. Ils ont constitué, avec la minimisation des coûts de construction, un problème d'optimisation à trois critères muni d'une contrainte zéro-énergie sur le bilan d'énergie finale initial. Le front de Pareto se caractérise, dans l'espace des objectifs, par une relation où l'investissement dans l'enveloppe tourné principalement vers la réduction des besoins de chauffage, diminue l'écart-type de l'émission de GES durant l'utilisation et augmente ainsi la robustesse de cette étape du cycle de vie. Une comparaison des solutions de ce front de Pareto à trois critères avec des solutions optimales de référence issues du POM Complet à deux critères a mis en perspective les résultats de ces problèmes d'optimisation. D'un côté, dans le problème d'optimisation usuel minimisant le coût et l'émission de GES total, les solutions optimales

peuvent se caractériser par des besoins de chauffage relativement élevés dus à la stratégie principale de l'algorithme tournée vers la minimisation des impacts d'une étape de construction prépondérante. De l'autre côté, l'application d'un critère supplémentaire sur la minimisation de la dispersion des impacts durant l'étape d'utilisation a permis de pondérer cette tendance initiale à l'abaissement de la performance de l'enveloppe. Les solutions les plus robustes sont celles qui ont les besoins de chauffage les plus faibles ce qui requiert dès lors des investissements supplémentaires dans l'isolation de l'enveloppe. Ainsi, à niveau égal d'émission de GES total, la solution la plus coûteuse et la mieux isolée devrait être favorisée d'un point de vue environnemental. Un exemple comparant deux solutions ayant les mêmes émissions de GES totales mais des coûts et une robustesse sur l'étape d'utilisation différentes a été donné. Cet exemple a mis en lumière une autre forme de déplacement des impacts durant l'optimisation : à niveau égal d'émission de GES totale, la solution la plus robuste étudiée avait moins d'impacts sur les étapes de construction et d'utilisation, et des impacts conséquents dans l'étape de déconstruction. La compréhension des mécanismes de l'optimisation multicritère dans la répartition des impacts entre les différentes étapes du cycle de vie du bâtiment est une problématique à part entière qui doit être étudiée en lien avec la définition et le nombre de fonctions objectif environnementales. Cet exemple a également montré que la meilleure dans l'étape d'utilisation s'est reflétée de façon limitée dans la robustesse des émissions de GES totales du cycle de vie. Cela peut s'expliquer par la contribution relativement faible de l'étape d'utilisation dans les impacts totaux. Dans cette première expérimentation numérique, l'écart-type a été utilisé comme indicateur de robustesse. Dans un objectif de robustesse des émissions de GES total, considérer un quantile aurait sans doute été plus pertinent, et ce type d'indicateur est proposé en perspective. Il s'agit dans ce chapitre de montrer la faisabilité de l'approche et de présenter un exemple d'application.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La généralisation des bâtiments zéro-énergie et à énergie positive dans la construction neuve incarne un enjeu considérable dans la transition écologique et soulève des défis, à la fois dans la réduction des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, et dans la maîtrise des coûts, notamment de la construction. Ces travaux de thèse ont eu pour objectif de mettre en perspective les méthodes de la SED, de l'ACV et de l'optimisation multicritère qui sont employées en écoconception de bâtiment zéro-énergie, et de développer une méthodologie qui améliore la fiabilité de leurs résultats et la robustesse des conceptions qu'ils permettent d'identifier dans une optimisation multicritère robuste.

Conclusion

Le premier chapitre a délivré une vue d'ensemble des nombreuses sources d'incertitudes peuvent nuire à la fiabilité d'une prise de décision en écoconception basée sur ces méthodes. Elles proviennent d'abord de la pratique même de la modélisation. La formulation mathématique du modèle et les données qui y sont employées doivent tendre vers une représentation la plus fidèle possible de la réalité. À mesure qu'un modèle se

complexifie, de plus en plus de données doivent être rassemblées qui représentent autant de sources d'incertitudes liées à leur qualité et à leur représentativité. D'autre part, l'objet d'étude du bâtiment en lui-même, ainsi que le contexte de la prise décision en écoconception, sont des sources importantes d'incertitudes épistémiques. Le bâtiment est un système complexe qui entretient des interactions dynamiques avec d'autres systèmes durant toute sa longue durée de vie. Dans le contexte d'une phase de conception, le bâtiment est nécessairement étudié sous l'angle de la prospective et de nombreuses sources d'incertitudes liées à l'ignorance envers le futur apparaissent. Par ailleurs, l'ACV d'un tel système complexe constitue un problème de modélisation ouvert, qui se caractérise par l'impossibilité de confronter les résultats du modèle à des mesures réelles pour évaluer sa fiabilité. Dans ce contexte, l'évaluation des performances environnementales du cycle de vie du bâtiment est hautement incertaine et affaiblit la fiabilité de ses résultats. Ce chapitre 1 a fait état de l'art des méthodes de prise en compte des incertitudes en ACV, en prise de décision et en optimisation multicritère robuste. En particulier, le champ de recherche de l'aide à la décision robuste préconise l'utilisation des outils de modélisation dans une approche exploratoire. L'objectif n'est plus d'essayer de prédire une seule issue la plus probable comme dans la pratique traditionnelle de la modélisation ; c'est illusoire au regard de l'ignorance profonde dans le futur et à l'impossibilité d'y assigner des probabilités. À la place, un large ensemble des issues possibles devrait être évalué afin d'en tirer les informations les plus utiles pour une prise de décision robuste. Une approche idéale consiste à combiner la propagation des incertitudes stochastiques pour des variabilités statistiques connues, et la propagation de scénarios d'évolution prospectifs.

Le deuxième chapitre a présenté la méthode d'évaluation environnementale du bâtiment et les modèles de SED, d'ACV et du système électrique qui la constituent. Plusieurs mises à jour ont été apportées aux données d'inventaire et aux méthodes de caractérisation utilisées en ACV afin d'améliorer la fiabilité de ses résultats. Une amélioration importante a concerné les données d'inventaire du système solaire PV domestique poly-Si ; elle diminue ses impacts en émission de GES de 45 % par rapport aux données initiales de la base ecoinvent. Cette amélioration est particulièrement importante dans l'écoconception de bâtiments zéro-énergie qui possèdent généralement des surfaces importantes de panneaux solaires PV. L'adoption de méthodes de caractérisation plus

récentes, basées sur la méthodologie d'Impact World+, permet d'améliorer nettement la qualité de l'évaluation des indicateurs de dommages aux écosystèmes et à la santé humaine en prenant un compte un ensemble plus exhaustif d'indicateurs environnementaux de niveau *endpoint*. Des développements sont encore nécessaires en ACV pour aboutir à des méthodes de caractérisation des dommages aux ressources naturelles qui intègrent les atteintes aux services écosystémiques. Ce chapitre inclut également la présentation du cas d'étude et de l'application de la méthode d'évaluation environnementale.

Le troisième chapitre a présenté la procédure d'optimisation multicritère et son application au cas d'étude dans l'objectif de minimiser l'émission de GES totale issue d'une ACV usuelle, et le coût de construction. Plusieurs hypothèses dans la définition du problème d'optimisation ont été explorées et concernent la complexité de l'espace de décision, la méthode d'échantillonnage de la population initiale de l'algorithme et la contrainte zéro-énergie basée sur l'énergie finale électrique ou l'énergie primaire calculée avec des coefficients issus de l'ACV dynamique. Les résultats ont montré l'importance d'un espace de décision suffisamment large pour atteindre de plus hauts niveaux d'optimalité dans l'espace des objectifs. Cet espace de décision plus complexe permet de comparer différentes solutions dans les types d'isolants et dans le système constructif. Toutefois la forte incertitude qui pèse sur les coûts de construction rend difficile de tirer des recommandations générales quant à ces solutions constructives. La méthode d'échantillonnage de la population initiale n'a pas montré d'influence significative sur la convergence finale de l'algorithme. Des études supplémentaires sur l'effet de ce choix pourraient être utiles. L'usage d'un bilan d'énergie primaire n'a pas non plus été particulièrement influent dans le cas étudié. Cet aspect pourrait être approfondi en intégrant des bâtiments qui présentent des consommations avec des profils temporels différents et mettant en jeu d'autres vecteurs énergétiques. Finalement, ce chapitre a présenté l'outil de visualisation interactive des coordonnées parallèles et la simplicité avec laquelle elle permet de sélectionner des solutions les plus adaptées aux attentes d'un décideur. Ces outils complètent la procédure d'optimisation multicritère et participent à l'élaboration d'une méthode globale d'aide à la décision. En ce qui concerne les résultats de l'optimisation, ils ont montré une tendance à minimiser l'isolation dans le but de réduire les impacts d'une étape de construction prépondérante par rapport aux autres étapes du

cycle de vie. Ainsi, les solutions obtenues ont des épaisseurs d'isolation qui peuvent paraître étrangement faibles, et des taux d'installation du double vitrage élevés. Ces résultats peuvent être liés aux caractéristiques du cas d'étude, notamment l'équipement d'une PAC performante qui assure de faibles consommations de chauffage malgré des besoins élevés. Ils reflètent la stratégie employée par l'algorithme d'optimisation relativement aux fonctions objectif (émission de GES et coût de construction) et aux contraintes posées (bilan zéro-énergie finale).

Le quatrième chapitre a présenté le développement d'une approche prospective en ACV dynamique adaptée à un usage en optimisation multicritère robuste. Cette approche est construite dans l'objectif d'explorer un maximum de cycles de vie possibles du bâtiment représentés sous forme de trajectoires chronologiques, pour un coût calculatoire le plus faible possible. Quatre sources d'incertitudes prospectives ont été retenues pour l'influence qu'elles peuvent avoir sur les impacts de l'étape d'utilisation du bâtiment : l'évolution du climat et du système électrique, la dégradation des performances du système solaire PV dû à son vieillissement et l'installation possible de la climatisation par les occupants. L'évolution du climat et du système ont nécessité des développements spécifiques afin de décrire les données météorologiques et de mix électrique à une échelle horaire. Cette description précise permet de conserver une cohérence temporelle et physique des interactions entre les variables météorologiques, la production d'électricité du système électrique national et les consommations et production d'électricité du bâtiment. Au final, cette approche permet d'évaluer 32 cycles de vie de bâtiment alternatifs pour un coût calculatoire multiplié seulement par 5 ce qui rend l'approche utilisable dans une optimisation multicritère robuste appliquée à l'écoconception d'un bâtiment. Les sources d'incertitude augmentent. Elles proviennent des modèles qui sont employés directement (le modèle du système électrique de Roux et al. (2017), la formulation mathématique de la méthode de *morphing*), et des modèles employés indirectement (les modèles climatiques globaux et régionaux, les scénarios prospectifs de RTE issus de leur modèle du système électrique). Des sources d'incertitudes existent aussi dans les nouveaux choix disponibles : le choix des modèles climatiques, le choix des travaux prospectifs explorés (d'autres auraient pu être considérés comme ceux de l'ADEME et de l'association négaWatt), la chronologie des scénarios sur les trajectoires de cycles de vie du bâtiment.

Enfin, le chapitre 5 a illustré sur un exemple l'utilisation de l'approche prospective de l'ACV dynamique du bâtiment dans une optimisation multicritère afin de prendre en compte des incertitudes dans le calcul de contrainte et de fonctions objectif. Une première application à la robustesse du bilan zéro-énergie du bâtiment a permis de mettre en avant l'influence que peuvent avoir le vieillissement des panneaux solaires PV et l'installation d'une climatisation dans le respect d'un bilan annuel producteur net en électricité tout au long de la vie du bâtiment. Ce problème comprenait des fonctions objectif de minimisation de l'émission de GES totale calculée avec l'ACV usuelle et de minimisation du coût de construction comme dans les POM du chapitre 3. La tendance d'une minimisation des impacts de l'enveloppe a été confirmée malgré la présence d'une contrainte robuste sur le bilan zéro-énergie. Un second problème d'optimisation robuste a été exploré qui se base cette fois sur une contrainte zéro-énergie usuelle (pas de prospective), une fonction objectif de minimisation des coûts de construction et deux fonctions objectif calculées avec l'approche prospective en ACV : la minimisation des émissions de GES totales sur les cycles de vie prospectifs et la minimisation de l'écart-type des émissions de GES prospectives sur l'étape d'utilisation. L'analyse des solutions optimales identifiées par l'algorithme a montré une tendance claire à la diminution des besoins de chauffage et l'augmentation du coût avec l'augmentation de la robustesse. La prise en compte de fonctions objectif supplémentaires augmente le nombre de solutions optimales proposées par l'algorithme et nécessite d'adopter une procédure de sélection cohérente pour ne retenir que les solutions de meilleure qualité. Ainsi, les solutions les plus robustes pour une émission de GES totale donnée ont été sélectionnées. Elles sont certes les plus chères du front, mais elles garantissent au décideur un choix parmi les solutions de meilleure qualité. Cette approche est utilisée pour sélectionner une solution robuste qui a la même émission de GES qu'une solution optimale identifiée dans le Chapitre 3. La solution la plus robuste est isolée en fibre de bois au lieu de la laine roche, elle possède une meilleure isolation de l'enveloppe, du triple vitrage sur l'essentiel des surfaces vitrées (façades Nord, Sud et Est) et une surface de panneaux solaires PV plus importante. Pour un surcoût de seulement 5330 € par rapport à la solution non robuste. Cette solution a un coût légèrement moindre que le cas initial (-5535 €) et permet une diminution moyenne de l'émission de GES totale de 20 %. Sa conception paraît également plus cohérente que les solutions obtenues dans les

POM du Chapitre 3 avec une forte isolation de l'enveloppe. La solution optimale robuste n'a pas une robustesse plus significative que la solution optimale non robuste sur l'indicateur d'émission de GES totale, malgré une émission de GES plus faible et légèrement plus robuste sur l'étape d'utilisation. Enfin, cet exemple a montré un cas de déplacement des impacts vers l'étape de déconstruction qui n'avait pas été anticipé en amont et souligne l'influence que peut avoir cette étape dans le cycle de vie d'un bâtiment ainsi que la problématique de son incertitude.

Perspectives

Les derniers résultats du Chapitre 5 questionnent la notion de robustesse et ce qu'elle signifie en optimisation multicritère. La *solution optimale robuste* qui a été identifiée ne présente pas une robustesse plus significative dans ses impacts totaux que sa solution non-robuste équivalente. Sous une autre perspective, l'approche qui a été proposée améliore nettement la robustesse de la *méthode d'aide à la décision basée sur l'optimisation multicritère* en présentant au décideur des solutions de meilleure qualité grâce à un processus de sélection basé sur l'usage combiné de deux critères de sélection principaux (émission de GES totale et coût de construction) et d'un critère de sélection secondaire (écart-type des émissions de GES de l'utilisation). L'articulation d'étapes de sélection successives, chacune basées sur un ou plusieurs objectifs à minimiser, est plus à même de prendre en compte la complexité du problème d'écoconception de bâtiment zéro-énergie et assure une aide à la décision plus robuste. Elle permet de d'associer une expertise qualitative en écoconception de bâtiment avec la puissance de résolution mathématique de l'optimisation multicritère. Une perspective de ces développements s'appuie sur l'ajout de fonctions objectif supplémentaires dans le problème d'optimisation multicritère, ce qui est davantage possible avec les algorithmes d'optimisation *many-objective* tels que l'algorithme NSGA-III (Deb et Jain, 2014). Rétrospectivement, Evins (2013) soulignait que l'optimisation multicritère est une procédure mathématique et non une méthode. La proposition précédente permettrait d'intégrer cette procédure au sein d'une méthode cohérente d'aide à la décision robuste en écoconception. Dans une perspective plus lointaine, l'articulation de différents niveaux de sélection pourrait être

intégrée au sein même de la procédure d'optimisation multicritère afin qu'elle fournisse directement à sa sortie les solutions de conception les plus adéquates.

L'influence de la définition d'une mesure de robustesse basée sur les moments statistiques (moyenne, écart-type, coefficient d'asymétrie, kurtosis), les centiles ou le maximum d'une distribution, devrait être explorée afin de mieux comprendre les différentes logiques que ces mesures peuvent induire dans les stratégies d'optimisation de l'algorithme. Ces études sont d'autant plus importantes que l'usage de l'optimisation en ACV de bâtiment peut produire des déplacements d'impacts entre les différentes étapes. Il est nécessaire de pouvoir anticiper ces mécanismes pour assurer la robustesse de l'aide à l'écoconception basé sur l'optimisation. La définition d'un problème d'optimisation contenant une fonction objectif environnementale pour chaque étape du cycle de vie du bâtiment, couplée à une étape de sélection basée sur la minimisation des impacts totaux, permettrait de maîtriser entièrement les déplacements d'impacts engendrés par l'algorithme. Cette piste peut être explorée grâce à l'usage d'algorithmes d'optimisation adaptés à de nombreux objectifs tels que NSGA-III.

Des perspectives concernent également l'approche prospective d'ACV dynamique du bâtiment. Dans un usage hors du cadre de l'optimisation multicritère les contraintes calculatoires sont bien moindres et permettent de considérer davantage de sources d'incertitudes et une description plus fine de la trajectoire temporelle d'un cycle de vie du bâtiment. L'intérêt principal de cette approche est d'apporter une contextualisation temporelle à l'exercice de la propagation d'incertitude. L'usage d'une méthode de Monte-Carlo du second ordre permettrait de combiner la propagation stochastique des incertitudes liées aux variabilités (météo, occupation, qualité des données) et la propagation d'incertitudes prospectives par scénarios. Une application intéressante à cette méthode pourrait être l'évaluation environnementale prospective comparée de bâtiments de basse technologie (*low-tech*) et de haute technologie (*high-tech*). L'incertitude liée à la dégradation des performances des matériaux et des équipements peut jouer un rôle très influent dans la définition d'une solution de conception optimale robuste.

L'adoption d'une approche conséquentielle en ACV est la plus adaptée dans un contexte de prise de décision en écoconception. Des données marginales dynamiques du

mix électrique sont utilisables grâce au modèle du système électrique de Roux et al. (2017). Cependant ces données marginales ne décrivent les aspects conséquentiels qu'à court terme, pour la première année d'utilisation d'un bâtiment. Dès l'année suivante, la composition du système de production électrique évolue et le mix marginal également. Des données de mix marginales horaires à moyen et à long terme peuvent être développées à partir de données prospectives sur l'évolution du système électrique. La méthode employée par Vandepaer et al. (2019) pourrait être adaptée au développement de données de mix marginal prospectif de résolution horaire en prenant en compte les différences entre la production dynamique future d'électricité et la production dynamique au moment de la prise de décision.

Des perspectives concernent l'espace de décision utilisé en optimisation multicritère robuste. La question des coûts est importante car elle influence fortement les caractéristiques des solutions issues de l'optimisation. L'usage d'une base de données de coûts représentative et régulièrement mise à jour permettrait de comparer un plus large choix de solutions de conception comme la construction en terre ou des technologies innovantes. L'élargissement des solutions de conceptions doit s'accompagner de l'usage d'une base de données environnementale régulièrement mise à jour. Un travail de collecte et d'analyse des différents travaux prospectifs dont les résultats peuvent être utilisés en ACV dynamique de bâtiment permettrait d'élargir l'exploration de futurs possibles et de la robustesse du bâtiment.

Enfin, la robustesse du bâtiment est une notion clés du concept plus général de résilience. L'étude de la résilience du bâtiment pose la question de son adaptabilité dans des conditions futures différentes. L'adaptation au changement climatique est un des enjeux actuels les plus importants notamment au regard du confort des occupants. L'installation d'une climatisation est une solution d'adaptation du bâtiment qui permet d'assurer le confort des occupants mais qui engendre des impacts plus importants. D'autres solutions techniques d'adaptation à moindre impact environnemental devraient être incluses dans le problème d'optimisation multicritère du bâtiment à travers l'espace de décision ou l'optimisation de l'architecture bioclimatique. L'évaluation du confort des

occupants devrait également être plus fiable, tant sur les questions de confort thermique et de son lien avec la ventilation naturelle, que sur les questions de confort lumineux.

L'idée la plus centrale derrière ses travaux réside dans l'acceptation des incertitudes et leur prise en compte la plus exhaustive possible dans une écoconception robuste. Elle s'accompagne d'un changement de perspective qui ne s'appuie plus sur la prédiction impossible d'un futur le « plus probable », mais sur la facilitation d'un futur le plus désirable pour le cycle de vie du bâtiment. Dans ce prolongement, l'aide à la décision robuste pour l'écoconception de bâtiment devrait pouvoir s'inspirer des développements en analyse de scénarios réalisés dans le champ de recherche de l'aide à la décision robuste.

BIBLIOGRAPHIE

ADALBERTH, K., 1997. Energy use during the life cycle of buildings: a method. In : *Building and Environment*. 1997. Vol. 32, n° 4, p. 317-320. DOI 10.1016/S0360-1323(96)00068-6.

AÏSSANI, A.,CHATEAUNEUF, A.,FONTAINE, J.-P. et AUDEBERT, P., 2016. Quantification of workmanship insulation defects and their impact on the thermal performance of building facades. In : *Applied Energy*. 2016. Vol. 165, p. 272-284. DOI 10.1016/j.apenergy.2015.12.040. Scopus

AKTAS, C. B. et BILEC, M. M., 2012. Impact of lifetime on US residential building LCA results. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 mars 2012. Vol. 17, n° 3, p. 337-349. DOI 10.1007/s11367-011-0363-x.

ALADIN INTERNATIONAL TEAM, 1997. The ALADIN project: Mesoscalemodelling seen as a basic tool for weather forecasting and atmospheric research. In : *WMO Bull.* 1997. n° 46, p. 317–324.

ANDERSEN, P. et BJERRREGAARD, E., 2001. Prospective Life-Cycle Assessment on Wind Power Technology by 2020. In : *TATuP - Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis*. 1 décembre 2001. Vol. 10, n° 4, p. 100-106. DOI 10.14512/tatup.10.4.100.

ANTIPOVA, E.,BOER, D.,GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G.,CABEZA, L. F. et JIMÉNEZ, L., 2014. Multi-objective optimization coupled with life cycle assessment for retrofitting buildings. In : *Energy and Buildings*. 1 octobre 2014. Vol. 82, p. 92-99. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.07.001.

ARMAND DUTREIX, 2010. *Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments*. S.l. : Eyrolles. ISBN 978-2-212-12702-7.

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*. 1 mai 2019. Vol. 241, p. 331-361. DOI 10.1016/j.apenergy.2019.03.028.

ASDRUBALI, F.,BAGGIO, P.,PRADA, A.,GRAZIESCHI, G. et GUATTARI, C., 2019. Dynamic life cycle assessment modelling of a NZEB building. In : *Energy*. 8 novembre 2019. p. 116489. DOI 10.1016/j.energy.2019.116489.

ASSOCIATION NÉGAWATT, 2018. *Scénario négaWatt 2017-2050 - Hypothèses et résultats* [en ligne]. France. [Consulté le 4 avril 2020]. Disponible à l'adresse : https://negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt_2017-2050_hypotheses-et-resultats.pdf.

ATHIENITIS, A.,O'BRIEN, W. et AYOUB, J., 2015. Introduction. In : *Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings* [en ligne]. S.l. : s.n. Wiley Online Books. [Consulté le 19 avril 2018]. Disponible à l'adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783433604625.ch01.

ATTIA, S., 2018. *Regenerative and Positive Impact Architecture: Learning from Case Studies* [en ligne]. S.l. : Springer International Publishing. [Consulté le 26 avril 2018]. SpringerBriefs in Energy. ISBN 978-3-319-66717-1. Disponible à l'adresse : //www.springer.com/us/book/9783319667171.

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.,SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2016. Évaluation des impacts environnementaux d'un projet de renforcement d'un réseau de transmission électrique par le biais de l'analyse du cycle de vie conséquentielle. In : *Cycle 2016*. Montréal, Canada : s.n. 13 octobre 2016.

AZARI, R.,GARSHASBI, S.,AMINI, P.,RASHED-ALI, H. et MOHAMMADI, Y., 2016. Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance. In : *Energy and Buildings*. 15 août 2016. Vol. 126, p. 524-534. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.05.054.

BEER, C.,ZIMOV, N.,OLOFSSON, J.,PORADA, P. et ZIMOV, S., 2020. Protection of Permafrost Soils from Thawing by Increasing Herbivore Density. In : *Scientific Reports*. 17 mars 2020. Vol. 10, n° 1, p. 4170. DOI 10.1038/s41598-020-60938-y.

BELCHER, S.,HACKER, J. et POWELL, D., 2005. Constructing design weather data for future climates. In : *Building Services Engineering Research and Technology*. février 2005. Vol. 26, n° 1, p. 49-61. DOI 10.1191/0143624405bt112oa.

BELOIN-SAINT-PIERRE, D.,PADEY, P.,PÉRISSET, B. et MEDICI, V., 2019. Considering the dynamics of electricity demand and production for the environmental benchmark of Swiss residential buildings that exclusively use electricity. In : *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. août 2019. Vol. 323, n° 1, p. 012096. DOI 10.1088/1755-1315/323/1/012096.

BERT METZ,LAMBERT KUIJPERS,SUSAN SOLOMON,STEPHEN O. ANDERSEN,OGUNLADE DAVIDSON,JOSÉ PONS,DAVID DE JAGER,TAHL KESTIN,MARTIN MANNING et LEO MEYER, 2005. *IPCC/TEAP Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System*. UK. IPCC/TEAP. Cambridge University Press.

BESSEAU, R., 2019. Analyse de cycle de vie de scénarios énergétiques intégrant la contrainte d'adéquation temporelle production-consommation. S.l. : PSL Research University.

BEYER, H.-G. et SENDHOFF, B., 2007. Robust optimization - A comprehensive survey. In : *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2007. Vol. 196, n° 33-34, p. 3190-3218. DOI 10.1016/j.cma.2007.03.003. Scopus

BJÖRKLUND, A. E., 2002. Survey of approaches to improve reliability in lca. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 mars 2002. Vol. 7, n° 2, p. 64. DOI 10.1007/BF02978849.

BLANCHARD, B. S. et FABRYCKY, W. J., 2011. *Systems Engineering and Analysis, 5th Edition*. Pearson. USA : s.n. Prentice Hall International series in industrial and systems engineering.

BLANK, J. et DEB, K., 2020. pymoo: Multi-objective Optimization in Python. In : *IEEE Access*. 2020. Vol. 8, p. 89497-89509. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2990567.

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.

BONNEUIL, C., 2017. Capitalocène. In : *EcoRev'*. 1 décembre 2017. Vol. N° 44, n° 1, p. 52-60.

BÖRJESON, L.,HÖJER, M.,DREBORG, K.-H.,EKVALL, T. et FINNVEDEN, G., 2006. Scenario types and techniques: Towards a user's guide. In : *Futures*. 1 septembre 2006. Vol. 38, n° 7, p. 723-739. DOI 10.1016/j.futures.2005.12.002.

BOUSTEAD, I., 1996. LCA — how it came about. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 septembre 1996. Vol. 1, n° 3, p. 147-150. DOI 10.1007/BF02978943.

BRASSELET, J.-P.,DOMBLIDES, J.-P. et MARCHIO, D., 1993. *Banc d'essais comparatif de progiciels de calculs de charges hygrothermiques*. Rapport d'étude pour l'AFME et EDF. S.l. AICVF-AITF-ARMINES.

BRAVO DIAS, J.,CARRILHO DA GRAÇA, G. et SOARES, P. M. M., 2020. Comparison of methodologies for generation of future weather data for building thermal energy simulation. In : *Energy and Buildings*. 1 janvier 2020. Vol. 206, p. 109556. DOI 10.1016/j.enbuild.2019.109556.

BRE, F. et FACHINOTTI, V. D., 2017. A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings. In : *Energy and Buildings*. 1 novembre 2017. Vol. 154, p. 283-294. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.08.002.

BREESCH, H. et JANSSENS, A., 2010. Performance evaluation of passive cooling in office buildings based on uncertainty and sensitivity analysis. In : *Solar Energy*. 1 août 2010. Vol. 84, n° 8, p. 1453-1467. DOI 10.1016/j.solener.2010.05.008.

BRUN, A.,SPITZ, C.,WURTZ, E. et MORA, L., 2009. Behavourial comparison of some predictive tools used in a low-energy building. In : *11th International IBPSA Conference*. Glasgow, Scotland : s.n. 2009. p. 1185-1190.

BUCKING, S.,ZMEUREANU, R. et ATHIENITIS, A., 2014. A methodology for identifying the influence of design variations on building energy performance. In : *Journal of Building Performance Simulation*. 2014. Vol. 7, n° 6, p. 411-426. DOI 10.1080/19401493.2013.863383. Scopus

BULLE, C.,MARGNI, M.,PATOUILLARD, 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. DOI 10.1007/s11367-019-01583-0. Scopus

BUYLE, M.,BRAET, J. et AUDENAERT, A., 2013. Life cycle assessment in the construction sector: A review. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 octobre 2013. Vol. 26, p. 379-388. DOI 10.1016/j.rser.2013.05.001.

CABEZA, L. F.,RINCÓN, L.,VILARIÑO, V.,PÉREZ, G. et CASTELL, A., 2014. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 janvier 2014. Vol. 29, p. 394-416. DOI 10.1016/j.rser.2013.08.037.

CLAVREUL, J.,GUYONNET, D.,TONINI, D. et CHRISTENSEN, T. H., 2013. Stochastic and epistemic uncertainty propagation in LCA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 août 2013. Vol. 18, n° 7, p. 1393-1403. DOI 10.1007/s11367-013-0572-6.

CLUZEL, F.,YANNOU, B.,MILLET, D. et LEROY, Y., 2014. Exploitation scenarios in industrial system LCA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 janvier 2014. Vol. 19, n° 1, p. 231-245. DOI 10.1007/s11367-013-0631-z.

COELHO, R. F.,XIAO, M.,GUGLIELMETTI, A.,HERRERA, M. et ZHANG, W., 2015. Investigation of Three Genotypes for Mixed Variable Evolutionary Optimization. In : *Advances in Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control in Engineering and Sciences* [en ligne]. S.l. : Springer, Cham. Computational Methods in Applied Sciences. p. 309-319. [Consulté le 9 avril 2018]. ISBN 978-3-319-11540-5. Disponible à l'adresse : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-11541-2_20.

COHEN, M.,SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2019. n°18IFC0216 : Démarche d'éco-conception sur le quartier Les Lumières à Saint-Denis, Expérimenter l'analyse de cycle de vie sur un projet, Rapport final. S.l. ADEME.

COLLINGE, W. O.,LANDIS, A. E.,JONES, A. K.,SCHAEFER, L. A. et BILEC, M. M., 2013. Dynamic life cycle assessment: Framework and application to an institutional building. In : *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2013. Vol. 18, n° 3, p. 538-552. DOI 10.1007/s11367-012-0528-2. Scopus

COLLINGE, William O.,RICKENBACKER, H. J.,LANDIS, A. E.,THIEL, C. L. et BILEC, M. M., 2018. Dynamic Life Cycle Assessments of a Conventional Green Building and a Net Zero Energy Building: Exploration of Static, Dynamic, Attributional, and Consequential Electricity Grid Models. In : *Environmental Science & Technology*. 2 octobre 2018. Vol. 52, n° 19, p. 11429-11438. DOI 10.1021/acs.est.7b06535.

COLLINGE, W.O.,RICKENBACKER, H. J.,LANDIS, A. E.,THIEL, C. L. et BILEC, M. M., 2018. Dynamic Life Cycle Assessments of a Conventional Green Building and a Net Zero Energy Building: Exploration of Static, Dynamic, Attributional, and Consequential Electricity Grid Models. In : *Environmental Science and Technology*. 2018. Vol. 52, n° 19, p. 11429-11438. DOI 10.1021/acs.est.7b06535. Scopus

COMBET, E.,MARCHAL, D. et VINCENT, I., 2017. ISBN 979-10-297-0921-0 : *ADEME - Rapport actualisation du scénario Energie Climat 2035-2050*. Angers. ADEME.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2011. CSN EN 15978:2011 - Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method [en ligne]. S.l. [Consulté le 30 avril 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.en-standard.eu/csn-en-15978-sustainability-of-construction-works-assessment-of-environmental-performance-of-buildings-calculation-method/.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2013. *PREN 15603:2013 Energy performance of buildings - Overarching standard EPBD* [en ligne]. Rapport technique. S.l. CEN. [Consulté le 21 avril 2018]. Disponible à l'adresse : https://infostore.saiglobal.com/en-gb/standards/pren-15603-2013-1635647/.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 1985. Test reference years (TRY) : Weather data sets for computer simulations of solar energy systems and energy consumption in buildings. [en ligne]. S.l. [Consulté le 1 septembre 2019]. Disponible à l'adresse : https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/876a6206-903a-4562-bde6-ccf15ca95b9d.

CORE WRITING TEAM,PACHAURI, R.K et REISINGER, A., 2007. IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [en ligne]. Geneva, Switzerland. IPCC. [Consulté le 27 juin 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm.

COSTA, A.,BUCCIO, E. D.,MELUCCI, M. et NANNICINI, G., 2017. Efficient Parameter Estimation for Information Retrieval using Black-box Optimization. In : *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2017. Vol. PP, n° 99, p. 1-1. DOI 10.1109/TKDE.2017.2761749.

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*. 1 mars 2020. Vol. 210, p. 109690. DOI 10.1016/j.enbuild.2019.109690.

CRUTZEN, P. J., 2002. Geology of mankind. In : *Nature*. janvier 2002. Vol. 415, n° 6867, p. 23-23. DOI 10.1038/415023a.

DE WILDE, P. et COLEY, D., 2012. The implications of a changing climate for buildings. In : *Building and Environment*. 1 septembre 2012. Vol. 55, p. 1-7. DOI 10.1016/j.buildenv.2012.03.014.

DE WILDE, P. et TIAN, W., 2009. Identification of key factors for uncertainty in the prediction of the thermal performance of an office building under climate change. In : *Building Simulation*. 1 septembre 2009. Vol. 2, n° 3, p. 157-174. DOI 10.1007/s12273-009-9116-1.

DE WILDE, P.,TIAN, W. et AUGENBROE, G., 2011. Longitudinal prediction of the operational energy use of buildings. In : *Building and Environment*. 1 août 2011. Vol. 46, n° 8, p. 1670-1680. DOI 10.1016/j.buildenv.2011.02.006.

DEB et JAIN, 2014. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-point Based Non-dominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints. In : . 2014.

DEB, K., 2015. Multi-objective evolutionary algorithms. In : *Springer Handbook of Computational Intelligence*. S.l. : s.n. p. 995-1015. Scopus

DEB, K. et GUPTA, H., 2006. Introducing Robustness in Multi-Objective Optimization. In : *Evolutionary Computation*. 16 novembre 2006. Vol. 14, n° 4, p. 463-494. DOI 10.1162/evco.2006.14.4.463.

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*. avril 2002. Vol. 6, n° 2, p. 182-197. DOI 10.1109/4235.996017.

DEB, K.,THIELE, L.,LAUMANNS, M. et ZITZLER, E., 2005. Scalable Test Problems for Evolutionary Multiobjective Optimization. In : *Evolutionary Multiobjective Optimization* [en ligne]. S.l. : Springer, London. Advanced Information and Knowledge Processing. p. 105-145. [Consulté le 2 mai 2018]. ISBN 978-1-85233-787-2. Disponible à l'adresse : https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-84628-137-7_6.

DEPARTMENT OF ENERGY & CLIMATE CHANGE, 2014. *Impacts of Leakage from Refrigerants in Heat Pumps* [en ligne]. UK. Department of Energy & Climate Change. [Consulté le 13 novembre 2019]. Disponible à l'adresse : https://www.gov.uk/government/publications/impacts-of-leakage-from-refrigerants-in-heat-pumps.

DING, Y.,WANG, Q.,KONG, X. et YANG, K., 2019. Multi-objective optimisation approach for campus energy plant operation based on building heating load scenarios. In : *Applied Energy*. 15 septembre 2019. Vol. 250, p. 1600-1617. DOI 10.1016/j.apenergy.2019.04.164.

DOMINGUEZ-RAMOS, A.,HELD, M.,ALDACO, R.,FISCHER, M. et IRABIEN, A., 2010. Prospective CO2 emissions from energy supplying systems: photovoltaic systems and conventional grid within Spanish frame conditions. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 juillet 2010. Vol. 15, n° 6, p. 557-566. DOI 10.1007/s11367-010-0192-3.

EGUARAS-MARTÍNEZ, M.,VIDAURRE-ARBIZU, M. et MARTÍN-GÓMEZ, C., 2014. Simulation and evaluation of Building Information Modeling in a real pilot site. In : *Applied Energy*. 1 février 2014. Vol. 114, p. 475-484. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.09.047.

EKVALL, T. et WEIDEMA, B. P., 2004. System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 mai 2004. Vol. 9, n° 3, p. 161-171. DOI 10.1007/BF02994190.

ELEFTHERIADIS, G. et HAMDY, M., 2018. The impact of insulation and HVAC degradation on overall building energy performance: A case study. In : *Buildings*. 2018. Vol. 8, n° 2. DOI 10.3390/buildings8020023. Scopus

EL-GHAZALI TALBI, 2009. Metaheuristics for Multiobjective Optimization (Ch. 4). In : *Metaheuristics: From Design to Implementation* [en ligne]. S.l. : John Wiley & Sons, Ltd. p. 308-384. [Consulté le 6 juillet 2020]. ISBN 978-0-470-49691-6. Disponible à l'adresse : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470496916.ch4.

ENTSO-E, 2015. TYNDP 2016 Scenario Development Report. Brussels, Belgium.

EUROPEAN COMMISSION, 2016. *EU Construction and Demolition Waste Management Protocol* [en ligne]. S.l. European Commission. [Consulté le 4 mars 2020]. Disponible à l'adresse : https://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0_en.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY, 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. Luxembourg. Publications Office of the European Union.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY, 2011. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First edition November 2011 [en ligne]. EUR 24571 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union. Disponible à l'adresse : http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC61049.

EUROPEAN COMMISSION,JOINT RESEARCH CENTRE et INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY, 2011. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook: framework and requirements for life cycle impact assessment models and indicators. Luxembourg : Publications Office. ISBN 978-92-79-17539-8.

EUROPEAN PARLIAMENT et COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2008. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance). 22 novembre 2008. S.l. : s.n.

EUROPEAN PARLIAMENT et COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2010. *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings* [en ligne]. 19 mai 2010. S.l. : s.n. [Consulté le 22 août 2017]. Disponible à l'adresse : http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj.

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.

EVINS, R., 2015. Multi-level optimization of building design, energy system sizing and operation. In : *Energy*. 2015. Vol. 90, p. 1775-1789. DOI 10.1016/j.energy.2015.07.007. Scopus

EVINS, R., 2016. A bi-level design and operation optimization process applied to an energy centre. In : *Journal of Building Performance Simulation*. 3 mai 2016. Vol. 9, n° 3, p. 255-271. DOI 10.1080/19401493.2015.1045034.

FARAH, S.,WHALEY, D.,SAMAN, W. et BOLAND, J., 2019. Integrating climate change into meteorological weather data for building energy simulation. In : *Energy and Buildings*. 15 janvier 2019. Vol. 183, p. 749-760. DOI 10.1016/j.enbuild.2018.11.045.

FEIST, W.,PFLUGER, R.,KAUFMANN, B.,SCHNIEDERS, J. et KAH, O., 2007. *Passive House Planning Package 2007*. Darmstadt. Passive House Institute.

FEIST, W. W. J., 2014. 6th update 2014 : *The world's first Passive House, Darmstadt-Kranichstein, Germany* [en ligne]. S.l. [Consulté le 21 avril 2018]. Disponible à l'adresse : DOI 10.13140/RG.2.1.4012.7526.

FINKELSTEIN, J. M. et SCHAFER, R. E., 1971. Improved Goodness-Of-Fit Tests. In : *Biometrika*. 1971. Vol. 58, n° 3, p. 641-645. DOI 10.2307/2334400. JSTOR

FINNVEDEN, G.,HAUSCHILD, M. Z.,EKVALL, T.,GUINÉE, J.,HEIJUNGS, R.,HELLWEG, S.,KOEHLER, A.,PENNINGTON, D. et SUH, S., 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. In : *Journal of Environmental Management*. octobre 2009. Vol. 91, n° 1, p. 1-21. DOI 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.

FONSECA I CASAS, P.,FONSECA I CASAS, A.,GARRIDO-SORIANO, N. et CASANOVAS, J., 2014. Formal simulation model to optimize building sustainability. In : *Advances in Engineering Software*. 1 mars 2014. Vol. 69, p. 62-74. DOI 10.1016/j.advengsoft.2013.12.009.

FOUQUET, M.,LEVASSEUR, A.,MARGNI, M.,LEBERT, A.,LASVAUX, S.,SOUYRI, B.,BUHÉ, C. et WOLOSZYN, M., 2015. Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. In : *Building and Environment*. 2015. Vol. 90, p. 51-59. DOI 10.1016/j.buildenv.2015.03.022. Scopus

FRISCHKNECHT, R.,BÜSSER, S. et KREWITT, W., 2009. Environmental assessment of future technologies: how to trim LCA to fit this goal? In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 septembre 2009. Vol. 14, n° 6, p. 584-588. DOI 10.1007/s11367-009-0120-6.

FRISCHKNECHT, R.,JUNGBLUTH, N.,ALTHAUS, H.-J.,DOKA, G.,DONES, R.,HECK, T.,HELLWEG, S.,HISCHIER, R.,NEMECEK, T.,REBITZER, G.,SPIELMANN, M. et WERNET, G., 2007. *Overview and Methodology*. Ecoinvent Report No. 1. Dübendorf. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

FRISCHKNECHT, R.,JUNGBLUTH, N.,ALTHAUS, H.-J.,DOKA, G.,DONES, R.,HELLWEG, S.,HISCHIER, R.,HUMBERT, S.,KÖLLNER, T.,LOERINCIK, Y.,MARGNI, M. et NEMECEK, T., 2007. *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*. Ecoinvent Report No. 3. Dübendorf. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

GARCÍA KERDAN, I.,RASLAN, R.,RUYSSEVELT, P. et MORILLÓN GÁLVEZ, D., 2017. ExRET-Opt: An automated exergy/exergoeconomic simulation framework for building energy retrofit analysis and design optimisation. In : *Applied Energy*. 15 avril 2017. Vol. 192, p. 33-58. DOI 10.1016/j.apenergy.2017.02.006.

GELARO, R.,MCCARTY, W.,SUÁREZ, M. J.,TODLING, R.,MOLOD, A.,TAKACS, L.,RANDLES, C. A.,DARMENOV, A.,BOSILOVICH, M. G.,REICHLE, R.,WARGAN, K.,COY, L.,CULLATHER, R.,DRAPER, C.,AKELLA, S.,BUCHARD, V.,CONATY, A.,DA SILVA, A. M.,GU, W.,KIM, G.-K.,KOSTER, R.,LUCCHESI, R.,MERKOVA, D.,NIELSEN, J. E.,PARTYKA, G.,PAWSON, S.,PUTMAN, W.,RIENECKER, M.,SCHUBERT, S. D.,SIENKIEWICZ, M. et ZHAO, B., 2017. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). In : *Journal of Climate*. 1 mai 2017. Vol. 30, n° 14, p. 5419-5454. DOI 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

GOEDKOOP, M. et SPRIENSMA, R., 2001. *The Eco-Indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment* [en ligne]. S.l. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/247848113_The_Eco-Indicator_99_A_Damage_Oriented_Method_for_Life_Cycle_Impact_Assessment.

GOODWIN, P.,KATAVOUTA, A.,ROUSSENOV, V. M.,FOSTER, G. L.,ROHLING, E. J. et WILLIAMS, R. G., 2018. Pathways to 1.5 °C and 2 °C warming based on observational and geological constraints. In : *Nature Geoscience*. février 2018. Vol. 11, n° 2, p. 102-107. DOI 10.1038/s41561-017-0054-8.

GRIFFITH, B.,LONG, N.,TORCELLINI, P.,JUDKOFF, R.,CRAWLEY, D. et RYAN, J., 2008. NREL/TP-550-41956, 926505 : *Methodology for Modeling Building Energy Performance across the Commercial Sector* [en ligne]. S.l. [Consulté le 9 mars 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.osti.gov/servlets/purl/926505-gmC2HN/.

GUINÉE, J. (éd.), 2002. *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards* [en ligne]. S.l. : Springer Netherlands. [Consulté le 14 juillet 2020]. Eco-Efficiency in Industry and Science. ISBN 978-1-4020-0228-1. Disponible à l'adresse : https://www.springer.com/gp/book/9781402002281.

GUIVARCH, C.,LEMPERT, R. et TRUTNEVYTE, E., 2017. Scenario techniques for energy and environmental research: An overview of recent developments to broaden the capacity to deal with complexity and uncertainty. In : *Environmental Modelling & Software*. 1 novembre 2017. Vol. 97, p. 201-210. DOI 10.1016/j.envsoft.2017.07.017.

HAMARAT, C.,KWAKKEL, J. H. et PRUYT, E., 2013. Adaptive Robust Design under deep uncertainty. In : *Technological Forecasting and Social Change*. 1 mars 2013. Vol. 80, n° 3, p. 408-418. DOI 10.1016/j.techfore.2012.10.004.

HAMDY, M.,SIRÉN, K. et ATTIA, S., 2017. Impact of financial assumptions on the cost optimality towards nearly zero energy buildings – A case study. In : *Energy and Buildings*. 15 octobre 2017. Vol. 153, p. 421-438. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.08.018.

HANED, N.,LANOIE, P.,PLOUFFE, S. et VERNIER, M.-F., 2014. *La profitabilité de l'écoconception : une analyse économique*. Montréal, Canada ; Saint-Etienne, France. Institut de développement de produits ; Pôle éco-conception et management du cycle de vie.

HARKOUSS, F.,FARDOUN, F. et BIWOLE, P., 2017. Multi-objective decision making optimization of a residential net zero energy building in cold climate. In : *2017 Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET)*. S.l. : s.n. septembre 2017. p. 1-4.

HAUPT, M.,KÄGI, T. et HELLWEG, S., 2018a. Life cycle inventories of waste management processes. In : *Data in Brief*. 1 août 2018. Vol. 19, p. 1441-1457. DOI 10.1016/j.dib.2018.05.067.

HAUPT, M.,KÄGI, T. et HELLWEG, S., 2018b. Modular life cycle assessment of municipal solid waste management. In : *Waste Management*. 1 septembre 2018. Vol. 79, p. 815-827. DOI 10.1016/j.wasman.2018.03.035.

HELLWEG, S. et CANALS, L. M. i, 2014. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. In : *Science*. 6 juin 2014. Vol. 344, n° 6188, p. 1109-1113. DOI 10.1126/science.1248361.

HERFRAY, G. et PEUPORTIER, B., 2012. Evaluation of electricity related impacts using dynamic a LCA model. In : *International Symposium on LIfe Cycle Assessment and Construction*. Nantes, juillet 2012 : s.n. 2012. p. 9.

HERMAN, J. D.,REED, P. M.,ZEFF, H. B. et CHARACKLIS, G. W., 2015. How Should Robustness Be Defined for Water Systems Planning under Change? In : *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1 octobre 2015. Vol. 141, n° 10, p. 04015012. DOI 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000509.

HERRERA, M.,NATARAJAN, S.,COLEY, D. A.,KERSHAW, T.,RAMALLO-GONZÁLEZ, A. P.,EAMES, M.,FOSAS, D. et WOOD, M., 2017. A review of current and future weather data for building simulation. In : *Building Services Engineering Research and Technology*. septembre 2017. Vol. 38, n° 5, p. 602-627. DOI 10.1177/0143624417705937.

HISAO ISHIBUCHI,NORITAKA TSUKAMOTO et YUSUKE NOJIMA, 2008. Evolutionary many-objective optimization: A short review. In : *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*. S.l. : s.n. juin 2008. p. 2419-2426.

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.

HONG, T.,CHANG, W.-K. et LIN, H.-W., 2013. A fresh look at weather impact on peak electricity demand and energy use of buildings using 30-year actual weather data. In : *Applied Energy*. 1 novembre 2013. Vol. 111, p. 333-350. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.05.019.

HOPFE, C. J. et HENSEN, J. L. M., 2011. Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. In : *Energy and Buildings*. 1 octobre 2011. Vol. 43, n° 10, p. 2798-2805. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.06.034.

HOPFE ET AL., 2012. Hopfe et al. (2012) Robust Multicriteria design optimisation in building design. In : . 2012.

HOXHA, E.,HABERT, G.,LASVAUX, S.,CHEVALIER, J. et LE ROY, R., 2017. Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. In : *Journal of Cleaner Production*. 15 février 2017. Vol. 144, p. 33-47. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.12.068.

HUANG, P.,HUANG, G. et SUN, Y., 2018a. A robust design of nearly zero energy building systems considering performance degradation and maintenance. In : *Energy*. 2018. Vol. 163, p. 905-919. DOI 10.1016/j.energy.2018.08.183. Scopus

HUANG, P.,HUANG, G. et SUN, Y., 2018b. Uncertainty-based life-cycle analysis of near-zero energy buildings for performance improvements. In : *Applied Energy*. 2018. Vol. 213, p. 486-498. DOI 10.1016/j.apenergy.2018.01.059. Scopus

HUBAND, S.,HINGSTON, P.,BARONE, L. et WHILE, L., 2006. A review of multiobjective test problems and a scalable test problem toolkit. In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. octobre 2006. Vol. 10, n° 5, p. 477-506. DOI 10.1109/TEVC.2005.861417.

HUIJBREGTS, M. A. J., 1998. Application of uncertainty and variability in LCA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 septembre 1998. Vol. 3, n° 5, p. 273. DOI 10.1007/BF02979835.

HUIJBREGTS, M. A. J.,NORRIS, G.,BRETZ, R.,CIROTH, A.,MAURICE, B.,VON BAHR, B.,WEIDEMA, B. et DE BEAUFORT, A. S. H., 2001. Framework for modelling data uncertainty in life cycle inventories. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 mai 2001. Vol. 6, n° 3, p. 127. DOI 10.1007/BF02978728.

HUIJBREGTS, M. A. J.,STEINMANN, Z. J. N.,ELSHOUT, P. M. F.,STAM, G.,VERONES, F.,VIEIRA, M.,ZIJP, M.,HOLLANDER, A. et ZELM, R. van, 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 février 2017. Vol. 22, n° 2, p. 138-147. DOI 10.1007/s11367-016-1246-y.

HUNT, Robert G.,FRANKLIN, W. E. et HUNT, R. G., 1996. LCA — How it came about: — Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. mars 1996. Vol. 1, n° 1, p. 4-7. DOI 10.1007/BF02978624.

IEA, 2019. *Key World Energy Statistics 2019* [en ligne]. S.l. International Energy Agency. Disponible à l'adresse : https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2005. ISO 15927-4:2005 - Performance hygrothermique des bâtiments - Calcul et présentation des données climatiques - Partie 4: Données horaires pour l'évaluation du besoin énergétique annuel de chauffage et de refroidissement [en ligne]. S.l. ISO. [Consulté le 12 mars 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/04/13/41371.html.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006a. *ISO 14040:2006 - Environmental Management: Life Cycle Assessment - Principles and Framework* [en ligne]. S.l. [Consulté le 29 janvier 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/74/37456.html.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006b. *ISO 14044:2006 - Environmental management: Life cycle assessment - Requirements and guidelines* [en ligne]. S.l. [Consulté le 5 mars 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en.

IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [en ligne]. IPBES secretariat, Bonn, Germany. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579.

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.

IPCC, 2014. Climate change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland. IPCC.

ISHIBUCHI, H.,IMADA, R.,SETOGUCHI, Y. et NOJIMA, Y., 2016. Performance comparison of NSGA-II and NSGA-III on various many-objective test problems. In : *2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. S.l. : s.n. juillet 2016. p. 3045-3052.

JACOB, D.,PETERSEN, J.,EGGERT, B.,ALIAS, A.,CHRISTENSEN, O. B.,BOUWER, L. M.,BRAUN, A.,COLETTE, A.,DÉQUÉ, M.,GEORGIEVSKI, G.,GEORGOPOULOU, E.,GOBIET, A.,MENUT, L.,NIKULIN, G.,HAENSLER, A.,HEMPELMANN, N.,JONES, C.,KEULER, K.,KOVATS, S.,KRÖNER, N.,KOTLARSKI, S.,KRIEGSMANN, A.,MARTIN, E.,VAN MEIJGAARD, E.,MOSELEY, C.,PFEIFER, S.,PREUSCHMANN, S.,RADERMACHER, C.,RADTKE, K.,RECHID, D.,ROUNSEVELL, M.,SAMUELSSON, P.,SOMOT, S.,SOUSSANA, J.-F.,TEICHMANN, C.,VALENTINI, R.,VAUTARD, R.,WEBER, B. et YIOU, P., 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. In : *Regional Environmental Change*. 1 avril 2014. Vol. 14, n° 2, p. 563-578. DOI 10.1007/s10113-013-0499-2.

JORDAN, D. C. et KURTZ, S. R., 2013. Photovoltaic Degradation Rates—an Analytical Review. In : *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2013. Vol. 21, n° 1, p. 12-29. DOI 10.1002/pip.1182.

JUAN, Y.-K.,GAO, P. et WANG, J., 2010. A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement. In : *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42, n° 3, p. 290-297. DOI 10.1016/j.enbuild.2009.09.006. Scopus

JUDKOFF, R. et NEYMARK, J., 1995. NREL/TP-472-6231 : *International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method* [en ligne]. Golden, CO. National Renewable Energy Laboratory. Disponible à l'adresse : http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/6231.pdf.

JUSSELME, T.,REY, E. et ANDERSEN, M., 2018. An integrative approach for embodied energy: Towards an LCA-based data-driven design method. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 mai 2018. Vol. 88, p. 123-132. DOI 10.1016/j.rser.2018.02.036.

JUSSELME, T.,TUOR, R.,LALANNE, D.,REY, E. et ANDERSEN, M., 2017. Visualization techniques for heterogeneous and multidimensional simulated building performance data sets. In : *Proceedings of the International Conference for Sustainable Design of the Built Environment*. 2017. p. 971-982.

KASPRZYK, J. R.,NATARAJ, S.,REED, P. M. et LEMPERT, R. J., 2013. Many objective robust decision making for complex environmental systems undergoing change. In : *Environmental Modelling and Software*. 2013. Vol. 42, p. 55-71. DOI 10.1016/j.envsoft.2012.12.007. Scopus

KISS, B.,KÁCSOR, E. et SZALAY, Z., 2020. Environmental assessment of future electricity mix – Linking an hourly economic model with LCA. In : *Journal of Cleaner Production*. 10 août 2020. Vol. 264, p. 121536. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121536.

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.

KITOUS, A. et DESPRÉS, J., 2018. EUR 29084 EN : *Assessment of the impact of climate change on residential energy demand for heating and cooling* [en ligne]. Luxembourg. Publications Office of the European Union. [Consulté le 18 septembre 2019]. Disponible à l'adresse : https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/assessment-impact-climate-change-residential-energy-demand-heating-and-cooling.

KOHLER, N., 1986. *Analyse énergétique de la construction, de l'utilisation et de la démolition de bâtiments* [en ligne]. Thèse de doctorat. S.l. : EPFL. Disponible à l'adresse : https://infoscience.epfl.ch/record/31103. No. 623

KOTIREDDY, R.,HOES, P.-J. et HENSEN, J. L. M., 2018. Integrating robustness indicators into multi-objective optimization to find robust optimal low-energy building designs. In : *Journal of Building Performance Simulation*. 3 octobre 2018. Vol. 0, n° 0, p. 1-20. DOI 10.1080/19401493.2018.1526971.

KRUISSELBRINK, J. W., 2012. *Evolution strategies for robust optimization* [en ligne]. Leiden, NL : Leiden Institute of Advanced Computer Science (LIACS), Faculty of Science, Leiden university. [Consulté le 3 mai 2018]. Disponible à l'adresse : https://openaccess.leidenuniv.nl/handle/1887/18931.

KWAKKEL, J. H.,EKER, S. et PRUYT, E., 2016. How Robust is a Robust Policy? Comparing Alternative Robustness Metrics for Robust Decision-Making. In : DOUMPOS, M., ZOPOUNIDIS, C. et GRIGOROUDIS, E. (éd.), *Robustness Analysis in Decision Aiding, Optimization, and Analytics* [en ligne]. Cham : Springer International Publishing. International Series in Operations Research & Management Science. p. 221-237. [Consulté le 10 juillet 2019]. ISBN 978-3-319-33121-8. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-3-319-33121-8_10.

KWAKKEL, J. H. et HAASNOOT, M., 2019. Supporting DMDU: A Taxonomy of Approaches and Tools. In : MARCHAU, V. A. W. J., WALKER, W. E., BLOEMEN, P. J. T. M. et POPPER, S. W. (éd.), *Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice* [en ligne]. Cham : Springer International Publishing. p. 355-374. [Consulté le 10 mai 2020]. ISBN 978-3-030-05252-2. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2_15.

LAMÉ, G. et LEROY, Y., 2015. Ecoconception des bâtiments : pratiques actuelles et freins à l'utilisation des outils d'écoconception - Une étude en France. In : *14e colloque AIP PRIMECA* [en ligne]. Aimé La Plagne, France : s.n. mars 2015. [Consulté le 22 mars 2018]. Disponible à l'adresse : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01184091.

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.

LECONTE, F., 2010. Validation empirique du logiciel PLEIADES+COMFIE dans le cas de bâtiments passifs – Etude préliminaire : Analyses d'incertitudes et de sensibilité. S.l.

LEMPERT, R. J., 2019. Robust Decision Making (RDM). In : MARCHAU, V. A. W. J., WALKER, W. E., BLOEMEN, P. J. T. M. et POPPER, S. W. (éd.), *Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice* [en ligne]. Cham : Springer International Publishing. p. 23-51. [Consulté le 8 mai 2020]. ISBN 978-3-030-05252-2. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2_2.

LEMPERT, R. J.,POPPER, S. W. et BANKES, S. C., 2003. *Shaping the next one hundred years: new methods for quantitative, long-term policy analysis*. Santa Monica : RAND. Rand Corporation / MR RPC, 1626. ISBN 978-0-8330-3275-1.

LEVASSEUR, A.,LESAGE, P.,MARGNI, M.,DESCHĚNES, L. et SAMSON, R., 2010. Considering time in LCA: Dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. In : *Environmental Science and Technology*. 2010. Vol. 44, n° 8, p. 3169-3174. DOI 10.1021/es9030003. Scopus

LEWANDOWSKA, A.,NOSKOWIAK, A.,PAJCHROWSKI, G. et ZAREBSKA, J., 2015. Between full LCA and energy certification methodology—a comparison of six methodological variants of buildings environmental assessment. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 janvier 2015. Vol. 20, n° 1, p. 9-22. DOI 10.1007/s11367-014-0805-3.

LEWIS, J. O.,HÓGÁIN, S. N. et BORGHI, A., 2013. *Cities of Tomorrow – Action Today. URBACT II Capitalisation. Building energy efficiency in European cities* [en ligne]. Report. France. URBACT. Disponible à l'adresse : https://urbact.eu/sites/default/files/import/general_library/19765_Urbact_WS6_ENERGY_low_FINAL.pdf.

LI, H. et WANG, S., 2019. Coordinated optimal design of zero/low energy buildings and their energy systems based on multi-stage design optimization. In : *Energy*. 15 décembre 2019. Vol. 189, p. 116202. DOI 10.1016/j.energy.2019.116202.

LI, H. et WANG, S., 2020. Coordinated robust optimal design of building envelope and energy systems for zero/low energy buildings considering uncertainties. In : *Applied Energy*. 1 mai 2020. Vol. 265, p. 114779. DOI 10.1016/j.apenergy.2020.114779.

LIGIER, S., 2017. Garantie de performance énergétique. In : . Paris. 14 février 2017.

LIGIER, S.,ROBILLART, M.,SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2017. Energy Performance Contracting Methodology Based upon Simulation and Measurement. In : *Building Simulation 2017*. San Francisco : s.n. 2017. p. 10.

LONGO, S.,MONTANA, F. et RIVA SANSEVERINO, E., 2019. A review on optimization and cost-optimal methodologies in low-energy buildings design and environmental considerations. In : *Sustainable Cities and Society*. 1 février 2019. Vol. 45, p. 87-104. DOI 10.1016/j.scs.2018.11.027.

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. DOI 10.1016/j.rser.2013.11.036. Scopus

MAGNIER, L. et HAGHIGHAT, F., 2010. Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. In : *Building and Environment*. 1 mars 2010. Vol. 45, n° 3, p. 739-746. DOI 10.1016/j.buildenv.2009.08.016.

MALMQVIST, T.,GLAUMANN, M.,SCARPELLINI, S.,ZABALZA, I.,ARANDA, A.,LLERA, E. et DÍAZ, S., 2011. Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. In : *Energy*. 1 avril 2011. Vol. 36, n° 4, p. 1900-1907. DOI 10.1016/j.energy.2010.03.026.

MANFREDI, S.,ALLACKER, K.,PELLETIER, N. et DE SOUZA, D. M., 2012. *Product Environmental Footprint (PEF) Guide*. S.l. JRC-EC.

MARCHAU, V. A. W. J.,WALKER, W. E.,BLOEMEN, P. J. T. M. et POPPER, S. W., 2019. Introduction. In : MARCHAU, V. A. W. J., WALKER, W. E., BLOEMEN, P. J. T. M. et POPPER, S. W. (éd.), *Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice* [en ligne]. Cham : Springer International Publishing. p. 1-20. [Consulté le 12 juillet 2020]. ISBN 978-3-030-05252-2. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2_1.

MARINI, C.,PADEY, P.,BLANC, I. et LE BOULCH, D., 2014. Assessing the prospective environmental impacts of photovoltaic systems based on a simplified LCA model. In : *SETAC Europe 24th Annual Meeting 2014: Science Across Bridges, Borders, and Boundaries* [en ligne]. Basel, CH : s.n. mai 2014. [Consulté le 30 avril 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/265017512_Assessing_the_prospective_environmental_impacts_of_photovoltaic_systems_based_on_a_simplified_LCA_model.

MARSH, R., 2017. Building lifespan: effect on the environmental impact of building components in a Danish perspective. In : *Architectural Engineering and Design Management*. 4 mars 2017. Vol. 13, n° 2, p. 80-100. DOI 10.1080/17452007.2016.1205471.

MARSZAL, A. J.,BOURRELLE, J.,MUSALL, E.,HEISELBERG, P.,GUSTAVSEN, A. et VOSS, K., 2010. Net Zero Energy Buildings - Calculation Methodologies Versus National Building Codes. In : [en ligne]. S.l. : International Solar Energy Society. 2010. p. 1-8. [Consulté le 19 avril 2018]. Disponible à l'adresse : http://proceedings.ises.org/citation?doi=eurosun.2010.06.14.

MARSZAL, A. J.,HEISELBERG, P.,BOURRELLE, J. S.,MUSALL, E.,VOSS, K.,SARTORI, I. et NAPOLITANO, A., 2011. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. In : *Energy and Buildings*. avril 2011. Vol. 43, n° 4, p. 971-979. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.12.022.

MASSON-DELMOTTE, V.,P. ZHAI,H.-O. PÖRTNER,D. ROBERTS,J. SKEA,P.R. SHUKLA,A. PIRANI,W. MOUFOUMA-OKIA,C. PÉAN,R. PIDCOCK,S. CONNORS,J.B.R. MATTHEWS,Y. CHEN,X. ZHOU,M.I. GOMIS,E. LONNOY,T. MAYCOCK,M. TIGNOR et T. WATERFIELD, 2018. *Summary for Policymakers*. Genève, Suisse. World Meteorological Organization. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

MECKESHEIMER, M.,BARTON, R. R.,SIMPSON, T.,LIMAYEM, F. et YANNOU, B., 2001. Metamodeling of Combined Discrete/Continuous Responses. In : *AIAA Journal*. 1 octobre 2001. Vol. 39, n° 10, p. 1950-1959. DOI 10.2514/2.1185.

MEYLAN, G.,HAUPT, M.,DUYGAN, M.,HELLWEG, S. et STAUFFACHER, M., 2018. Linking energy scenarios and waste storylines for prospective environmental assessment of waste management systems. In : *Waste Management*. 1 novembre 2018. Vol. 81, p. 11-21. DOI 10.1016/j.wasman.2018.09.017.

MOAZAMI, Amin,CARLUCCI, S.,NIK, V. M. et GEVING, S., 2019. Towards climate robust buildings: An innovative method for designing buildings with robust energy performance under climate change. In : *Energy and Buildings*. 1 novembre 2019. Vol. 202, p. 109378. DOI 10.1016/j.enbuild.2019.109378.

MOAZAMI, A.,NIK, V. M.,CARLUCCI, S. et GEVING, S., 2019. Impacts of future weather data typology on building energy performance – Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions. In : *Applied Energy*. 2019. p. 696-720. DOI 10.1016/j.apenergy.2019.01.085. Scopus

MORALES, M. F. D.,REGULY, N.,KIRCHHEIM, A. P. et PASSUELLO, A., 2020. Uncertainties related to the replacement stage in LCA of buildings: A case study of a structural masonry clay hollow brick wall. In : *Journal of Cleaner Production*. 1 avril 2020. Vol. 251, p. 119649. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.119649.

MOSS, R. H.,EDMONDS, J. A.,HIBBARD, K. A.,MANNING, M. R.,ROSE, S. K.,VAN VUUREN, D. P.,CARTER, T. R.,EMORI, S.,KAINUMA, M.,KRAM, T.,MEEHL, G. A.,MITCHELL, J. F. B.,NAKICENOVIC, N.,RIAHI, K.,SMITH, S. J.,STOUFFER, R. J.,THOMSON, A. M.,WEYANT, J. P. et WILBANKS, T. J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. In : *Nature*. février 2010. Vol. 463, n° 7282, p. 747-756. DOI 10.1038/nature08823.

MUNARETTO, F.,RECHT, T.,SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2017. Empirical validation of different internal superficial heat transfer models on a full-scale passive house. In : *Journal of Building Performance Simulation*. 6 juin 2017. Vol. 0, n° 0, p. 1-22. DOI 10.1080/19401493.2017.1331376.

MÜNSTER, M.,FINNVEDEN, G. et WENZEL, H., 2013. Future waste treatment and energy systems – examples of joint scenarios. In : *Waste Management*. 1 novembre 2013. Vol. 33, n° 11, p. 2457-2464. DOI 10.1016/j.wasman.2013.07.013.

MUTEL, C. L.,PFISTER, S. et HELLWEG, S., 2012. GIS-Based Regionalized Life Cycle Assessment: How Big Is Small Enough? Methodology and Case Study of Electricity Generation. In : *Environmental Science & Technology*. 17 janvier 2012. Vol. 46, n° 2, p. 1096-1103. DOI 10.1021/es203117z.

NABONI, E.,MACCARINI, A.,KOROLIJA, I. et ZHANG, Y., 2013. Comparison of conventional, parametric and evolutionary optimization approaches for the architectural design of nearly zero energy buildings. In : *Proceedings of BS2013*. Chambréy, France : s.n. 2013.

NADEAU, J.-P. et PUIGGALI, J.-R., 1995. *Séchage : Des processus physiques aux procédés industriels*. S.l. : Tec & Doc Lavoisier.

NEGISHI, K.,LEBERT, A.,ALMEIDA, D.,CHEVALIER, J. et TIRUTA-BARNA, L., 2019. Evaluating climate change pathways through a building's lifecycle based on Dynamic Life Cycle Assessment. In : *Building and Environment*. 15 octobre 2019. Vol. 164, p. 106377. DOI 10.1016/j.buildenv.2019.106377.

NEGISHI, K.,TIRUTA-BARNA, L.,SCHIOPU, N.,LEBERT, A. et CHEVALIER, J., 2018. An operational methodology for applying dynamic Life Cycle Assessment to buildings. In : *Building and Environment*. 15 octobre 2018. Vol. 144, p. 611-621. DOI 10.1016/j.buildenv.2018.09.005.

NGUYEN, A.-T.,REITER, S. et RIGO, P., 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. In : *Applied Energy*. janvier 2014. Vol. 113, p. 1043-1058. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.08.061.

NIK, V. M., 2016. Making energy simulation easier for future climate – Synthesizing typical and extreme weather data sets out of regional climate models (RCMs). In : *Applied Energy*. 1 septembre 2016. Vol. 177, p. 204-226. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.05.107.

NIX, E.,DAS, P.,TAYLOR, J. et DAVIES, M., 2015. Employing a multi-Objective robust optimisation method for healthy and low-energy dwelling design in Delhi, India. In : *14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings*. S.l. : s.n. 2015. p. 2093-2100. Scopus

NUGENT, D. et SOVACOOL, B. K., 2014. Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. In : *Energy Policy*. 1 février 2014. Vol. 65, p. 229-244. DOI 10.1016/j.enpol.2013.10.048.

NWODO, M. N. et ANUMBA, C. J., 2019. A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach. In : *Building and Environment*. 1 septembre 2019. Vol. 162, p. 106290. DOI 10.1016/j.buildenv.2019.106290.

OLONSCHECK, M.,HOLSTEN, A. et KROPP, J. P., 2011. Heating and cooling energy demand and related emissions of the German residential building stock under climate change. In : *Energy Policy*. 1 septembre 2011. Vol. 39, n° 9, p. 4795-4806. DOI 10.1016/j.enpol.2011.06.041.

OLSEN, S. I.,BORUP, M. et ANDERSEN, P. D., 2018. Future-Oriented LCA. In : HAUSCHILD, M. Z., ROSENBAUM, R. K. et OLSEN, S. I. (éd.), *Life Cycle Assessment: Theory and Practice* [en ligne]. Cham : Springer International Publishing. p. 499-518. [Consulté le 29 janvier 2020]. ISBN 978-3-319-56475-3. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_21.

ORESKES, N.,SHRADER-FRECHETTE, K. et BELITZ, K., 1994. Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. In : *Science*. 1994. Vol. 263, n° 5147, p. 641-646. JSTOR

ORTIZ-RODRÍGUEZ, O.,CASTELLS, F. et SONNEMANN, G., 2010. Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. In : *Science of The Total Environment*. 15 mai 2010. Vol. 408, n° 12, p. 2435-2443. DOI 10.1016/j.scitotenv.2010.02.021.

OSMANI, M., 2011. Chapter 15 - Construction Waste. In : LETCHER, T. M. et VALLERO, D. A. (éd.), *Waste* [en ligne]. Boston : Academic Press. p. 207-218. [Consulté le 28 juin 2020]. ISBN 978-0-12-381475-3. Disponible à l'adresse : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123814753100154.

ØSTERGÅRD, T.,JENSEN, Rasmus L. et MAAGAARD, S. E., 2017. Early Building Design: Informed decision-making by exploring multidimensional design space using sensitivity analysis. In : *Energy and Buildings*. 1 mai 2017. Vol. 142, n° Supplement C, p. 8-22. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.02.059.

ØSTERGÅRD, T.,JENSEN, Rasmus Lund et MAAGAARD, S. E., 2017. Interactive Building Design Space Exploration Using Regionalized Sensitivity Analysis. In : *Proceedings of the 15th IBPSA Conference*. San Francisco, CA, USA : s.n. 2017. p. 1300-1309.

PANNIER, M.-L., 2014. *Analyse de cycle de vie des maisons passives de la plateforme INCAS* [en ligne]. Rapport de stage. S.l. INSA de Strasbourg. Disponible à l'adresse : http://eprints2.insa-strasbourg.fr/1743/1/Pannier_Marie-Lise_GCE_-_PFE_-_Synth%C3%A8se.pdf.

PANNIER, M.-L., 2017a. Etude de la quantification des incertitudes en ACV des bâtiments. In : . Paris. 14 février 2017.

PANNIER, M.-L., 2017b. Etude de la quantification des incertitudes en analyse de cycle de vie des bâtiments. Thèse de doctorat. S.l. : MINES ParisTech PSL.

PANNIER, M.-L.,BOILEAU, H. et BUHÉ, C., 2019. Identification Of Energy, Environmental And Economical Optimal Refurbishment Scenarios For Hotels In The Alps. In : *Building Simulation 2019* [en ligne]. Rome, Italy : s.n. septembre 2019. p. 2894-2901. [Consulté le 3 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2019/BS2019_210610.pdf.

PANNIER, M.-L.,SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2018. Comprehensive assessment of sensitivity analysis methods for the identification of influential factors in building life cycle assessment. In : *Journal of Cleaner Production*. 20 octobre 2018. Vol. 199, p. 466-480. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.07.070.

PEÑALOZA, D.,NORÉN, J. et ERIKSSON, P.-E., 2013. *Life Cycle Assessment of Different Building Systems : The Wälludden Case Study* [en ligne]. S.l. [Consulté le 18 mai 2020]. Disponible à l'adresse : https://www.semanticscholar.org/paper/Life-Cycle-Assessment-of-Different-Building-Systems-Pe%C3%B1aloza-Nor%C3%A9n/fcd67d060171a868d976d462d54f13199828c106.

PERERA, A. T. D., 2019. Modeling and Assessment of Urban Energy Systems. In : *Infoscience* [en ligne]. 2019. [Consulté le 17 décembre 2019]. Disponible à l'adresse : https://infoscience.epfl.ch/record/265410.

PESONEN, H.-L.,EKVALL, T.,FLEISCHER, G.,HUPPES, G.,JAHN, C.,KLOS, Z. S.,REBITZER, G.,SONNEMANN, G. W.,TINTINELLI, A.,WEIDEMA, B. P. et WENZEL, H., 2000. Framework for scenario development in LCA. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 janvier 2000. Vol. 5, n° 1, p. 21. DOI 10.1007/BF02978555.

PEUPORTIER, B., 1993. COMFIE, logiciel pour l'architecture bioclimatique, quelques applications pour les vérandas. In : *Journée technique GENEC (CEA)*. Cadarache, 1993 : s.n. 1993.

PEUPORTIER, B., 2005. Bancs d'essais de logiciels de simulation thermique. In : *Proceedings SFT-IBPSA*. La Rochelle : ENSMP. mars 2005.

PEUPORTIER, B., 2008. *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*. S.l. : Les Presses MINES ParisTech. ISBN 978-2-35671-010-9.

PEUPORTIER, B., 2014. *Ecoconception des bâtiments et des quartiers*. 2014. S.l. : Techniques de l'ingénieur.

PEUPORTIER, B. et BLANC-SOMMEREUX, I., 1990. Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings. In : *International Journal of Solar Energy*. 1990. Vol. 8, n° 2, p. 109--120. DOI 10.1080/01425919008909714.

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 : *Sustainable Building Conference 2004*. Warsaw, Poland : s.n. 2004.

PEUPORTIER, B.,KOHLER, K. et BOONSTRA, C., 1997. European project REGENER, life cycle analysis of buildings. In : *2nd International Conference "Buildings and the Environment"*. Paris, 9-12 Juin 1997 : s.n. 9 juin 1997. p. 8.

PEUPORTIER, B. et PUTZEYS, K., 2005. Practical recommendations for sustainable construction PRESCO - Work Package 2 - Inter-comparison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools. S.l.

PEUPORTIER, B.,THIERS, S. et GUIAVARCH, A., 2013. Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment. In : *Journal of Cleaner Production*. janvier 2013. Vol. 39, n° 0, p. 73-78. DOI 10.1016/j.jclepro.2012.08.041.

PLEVIN, R. J.,DELUCCHI, M. A. et CREUTZIG, F., 2014. Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers. In : *Journal of Industrial Ecology*. 2014. Vol. 18, n° 1, p. 73-83. DOI 10.1111/jiec.12074.

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.

POPOVICI, E., 2005. *Contribution to the life cycle assessment of settlements*. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris : École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

RAILLARD, N., 2019. *Synthesis report - Exploring futures to plan energy transition* [en ligne]. S.l. The Shift Project. Disponible à l'adresse : https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/11/2019-11-07_Synthesis-Report_Exploring-Futures-to-Plan-Energy-Transition_The-Shift-Project.pdf.

RAMON, D.,ALLACKER, K.,VAN LIPZIG, N. P. M.,DE TROYER, F. et WOUTERS, H., 2019. Future Weather Data for Dynamic Building Energy Simulations: Overview of Available Data and Presentation of Newly Derived Data for Belgium. In : MOTOASCA, E., AGARWAL, A. K. et BREESCH, H. (éd.), *Energy Sustainability in Built and Urban Environments* [en ligne]. Singapore : Springer. Energy, Environment, and Sustainability. p. 111-138. [Consulté le 22 janvier 2020]. ISBN 9789811332845. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-981-13-3284-5_6.

RASMUSSEN, B.,BORUP, M.,BORCH, K. et ANDERSEN, P. D., 2005. Prospective technology studies with a life cycle perspective. In : *International Journal of Technology, Policy and Management*. 2005. Vol. 5, n° 3, p. 227. DOI 10.1504/IJTPM.2005.008405.

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.

RECHT, T.,MUNARETTO, F.,SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2014. Analyse de la fiabilité de COMFIE par comparaison à des mesures. Application à un bâtiment passif. In : *IBPSA France 2014* [en ligne]. Arras, France : s.n. 2014. p. 9. Disponible à l'adresse : https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01461407/document.

REHBERGER, M. et HIETE, M., 2015. Considering supply and demand of electric energy in life cycle assessments – a review of current methodologies. In : *Matériaux & Techniques*. 2015. Vol. 103, n° 1, p. 105. DOI 10.1051/mattech/2015006.

RIVALLAIN, M., 2013. Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants [en ligne]. Thèse de doctorat. S.l. : Université Paris Est. [Consulté le 10 octobre 2013]. Disponible à l'adresse : http://www.theses.fr/2013PEST1038.

ROBILLART, M., 2015. *Étude de stratégies de gestion en temps réel pour des bâtiments énergétiquement performants*. Thèse de doctorat. S.l. : École nationale supérieure des mines de Paris.

ROUX, C., 2016. Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis. Thèse de doctorat. S.l. : MINES ParisTech.

ROUX, C.,SCHALBART, P.,ASSOUMOU, E. et PEUPORTIER, B., 2016. Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts. In : *Applied Energy*. 2016. Vol. 184, p. 619-629. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.10.043. Scopus

ROUX, Charlotte,SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2016. Accounting for temporal variation of electricity production and consumption in the LCA of an energy-efficient house. In : *Journal of Cleaner Production*. 1 février 2016. Vol. 113, p. 532-540. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.11.052.

ROUX, C.,SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2016. Accounting for temporal variation of electricity production and consumption in the LCA of an energy-efficient house. In : *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 113, p. 532-540. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.11.052. Scopus

ROUX, C.,SCHALBART, P. et PEUPORTIER, B., 2017. Development of an electricity system model allowing dynamic and marginal approaches in LCA—tested in the French context of space heating in buildings. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 1 août 2017. Vol. 22, n° 8, p. 1177-1190. DOI 10.1007/s11367-016-1229-z.

RTE, 2017. *Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France - édition 2017* [en ligne]. France. RTE. Disponible à l'adresse : https://www.rte-france.com/sites/default/files/bp2017_complet_vf.pdf.

RTE, 2019. *Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France 2019 - Rapport technique* [en ligne]. France. RTE. Disponible à l'adresse : https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bp2019_synthegse_12_1_0.pdf.

RYSANEK, A. M. et CHOUDHARY, R., 2013. Optimum building energy retrofits under technical and economic uncertainty. In : *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 57, p. 324-337. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.10.027. Scopus

SAADE, M. R. M.,GUEST, G. et AMOR, B., 2019. Comparative whole building LCAs: How far are our expectations from the documented evidence? In : *Building and Environment*. 4 octobre 2019. Vol. 167, p. 106449. DOI 10.1016/j.buildenv.2019.106449.

SALMON, N.,DUCLOS, L.,PEUPORTIER, B.,HERFRAY, G.,CHEVALIER, J.,SCHIOPU, N.,LASVAUX, S.,LEBERT, A.,SÉNÉGAS, J.-L.,RENAUD, M.,OLIVIER, S. et THIERRY, R., 2011. *Connaissance de l'impact environnemental des bâtiments - COIMBA 2011, Développement des outils d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments par analyse de cycle de vie* [en ligne]. S.l. Nobatek, ARMINES, CSTB, IZUBA Energies, ENERTECH. Disponible à l'adresse : http://www.nobatek.com/downloads/Etudes%20publiques/Coimba_Synthese_NOBATEK.pdf.

SALOM, J.,WIDÉN, J.,CANDANEDO, J.,SARTORI, I.,VOSS, K. et MARSZAL, A., 2011. Understanding net zero energy buildings: Evaluation of load matching and grid interaction indicators. In : *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*. S.l. : s.n. 2011. p. 2514-2521. Scopus

SALTELLI, A.,STARK, P. B.,BECKER, W. et STANO, P., 2015. Climate models as economic guides scientific challenge or quixotic quest? In : *Issues in Science and Technology*. 2015. Vol. 31, n° 3, p. 79-84. Scopus

SARTORI, I.,NAPOLITANO, A. et VOSS, K., 2012. Net zero energy buildings: A consistent definition framework. In : *Energy and Buildings*. mai 2012. Vol. 48, p. 220-232. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.01.032.

SAVAGE, L. T., 1954. *The foundations of statistics*. New York, USA : Wiley.

SHI, X.,TIAN, Z.,CHEN, W.,SI, B. et JIN, X., 2016. A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 novembre 2016. Vol. 65, p. 872-884. DOI 10.1016/j.rser.2016.07.050.

SIMON, H. A., 1969. *The Sciences of the Artificial* [en ligne]. Cambridge, Massachusetts : MIT Press. [Consulté le 13 juillet 2020]. Disponible à l'adresse : https://mitpress.mit.edu/books/sciences-artificial.

SOARES, N.,BASTOS, J.,PEREIRA, L. D.,SOARES, A.,AMARAL, A. R.,ASADI, E.,RODRIGUES, E.,LAMAS, F. B.,MONTEIRO, H.,LOPES, M. A. R. et GASPAR, A. R., 2017. A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. septembre 2017. Vol. 77, p. 845-860. DOI 10.1016/j.rser.2017.04.027.

SOBOL I.M., 1967. Distribution of points in a cube and approximate evaluation of integrals. In : *U.S.S.R Comput. Maths. Math. Phys.* 1967. n° 7, p. 86-112.

SON, H. et KIM, C., 2016. Evolutionary Multi-objective Optimization in Building Retrofit Planning Problem. In : *Procedia Engineering*. 1 janvier 2016. Vol. 145, p. 565-570. DOI 10.1016/j.proeng.2016.04.045.

SON, H. et KIM, C., 2018. Evolutionary many-objective optimization for retrofit planning in public buildings: A comparative study. In : *Journal of Cleaner Production*. 20 juillet 2018. Vol. 190, p. 403-410. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.04.102.

SOROUDI, A. et AMRAEE, T., 2013. Decision making under uncertainty in energy systems: State of the art. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 décembre 2013. Vol. 28, p. 376-384. DOI 10.1016/j.rser.2013.08.039.

STEFFEN, W.,ROCKSTRÖM, J.,RICHARDSON, K.,LENTON, T. M.,FOLKE, C.,LIVERMAN, D.,SUMMERHAYES, C. P.,BARNOSKY, A. D.,CORNELL, S. E.,CRUCIFIX, M.,DONGES, J. F.,FETZER, I.,LADE, S. J.,SCHEFFER, M.,WINKELMANN, R. et SCHELLNHUBER, H. J., 2018. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2018. Vol. 115, n° 33, p. 8252-8259. DOI 10.1073/pnas.1810141115. Scopus

STEPHAN, A.,CRAWFORD, R. H. et DE MYTTENAERE, K., 2013. A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses. In : *Applied Energy*. 1 décembre 2013. Vol. 112, p. 23-34. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.05.076.

STOLZ, P. et FRISCHKNECHT, R., 2016. *Life Cycle Assessment of Photovoltaic Module Recycling*. Switzerland. Treeze Ltd.

SU, S.,LI, X. et ZHU, Y., 2019. Dynamic assessment elements and their prospective solutions in dynamic life cycle assessment of buildings. In : *Building and Environment*. 2019. Vol. 158, p. 248-259. DOI 10.1016/j.buildenv.2019.05.008. Scopus

TAGUCHI, G. et YOKOYAMA, T., 1993. Taguchi Methods: Design of Experiments. In : *ASI Press*. 1993.

TAYLOR, K. E.,STOUFFER, R. J. et MEEHL, G. A., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. In : *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1 avril 2012. Vol. 93, n° 4, p. 485-498. DOI 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

THEVENARD, D. et HADDAD, K., 2006. Ground reflectivity in the context of building energy simulation. In : *Energy and Buildings*. 1 août 2006. Vol. 38, n° 8, p. 972-980. DOI 10.1016/j.enbuild.2005.11.007.

TIAN, W.,HEO, Y.,DE WILDE, P.,LI, Z.,YAN, D.,PARK, C. S.,FENG, X. et AUGENBROE, G., 2018. A review of uncertainty analysis in building energy assessment. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 octobre 2018. Vol. 93, p. 285-301. DOI 10.1016/j.rser.2018.05.029.

TIAN, W. et WILDE, P. de, 2011. Thermal building simulation using the UKCP09 probabilistic climate projections. In : *Journal of Building Performance Simulation*. 1 juin 2011. Vol. 4, n° 2, p. 105-124. DOI 10.1080/19401493.2010.502246.

TORCELLINI, P.,PLESS, S. et DERU, M., 2006. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. In : *National Renewable Energy Laboratory and Department of Energy*. US : s.n. 2006. p. 15.

UNEP, 2003. 2002 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee – 2002 Assessment. Nairobi, Kenya. UNEP Ozone Secretariat.

UNEP, 2011. 2010 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee - 2010 Assessment. Nairobi, Kenya. UNEP Ozone Secretariat.

VAN VUUREN, D. P.,EDMONDS, J.,KAINUMA, M.,RIAHI, K.,THOMSON, A.,HIBBARD, K.,HURTT, G. C.,KRAM, T.,KREY, V.,LAMARQUE, J.-F.,MASUI, T.,MEINSHAUSEN, M.,NAKICENOVIC, N.,SMITH, S. J. et ROSE, S. K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. In : *Climatic Change*. 5 août 2011. Vol. 109, n° 1, p. 5. DOI 10.1007/s10584-011-0148-z.

VANDEPAER, L.,TREYER, K.,MUTEL, C.,BAUER, C. et AMOR, B., 2019. The integration of long-term marginal electricity supply mixes in the ecoinvent consequential database version 3.4 and examination of modeling choices. In : *The International Journal of Life Cycle Assessment*. août 2019. Vol. 24, n° 8, p. 1409-1428. DOI 10.1007/s11367-018-1571-4.

VIEIRA, P. S. et HORVATH, A., 2008. Assessing the end-of-life impacts of buildings. In : *Environmental Science and Technology*. 2008. Vol. 42, n° 13, p. 4663-4669. DOI 10.1021/es071345l. 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.

VOSS, K.,SARTORI, I.,NAPOLITANO, A.,GEIER, S.,GONÇALVES, H.,HALL, M.,HEISELBERG, P.,WIDÉN, J.,CANDANEDO, J. A.,MUSALL, E.,KARLSSON, B. et TORCELLINI, P., 2010. Load Matching and Grid Interaction of Net Zero Energy Buildings. In : [en ligne]. S.l. : International Solar Energy Society. 2010. p. 1-8. [Consulté le 21 avril 2018]. Disponible à l'adresse : http://proceedings.ises.org/citation?doi=eurosun.2010.06.24.

WADDICOR, D. A.,FUENTES, E.,SISÓ, L.,SALOM, J.,FAVRE, B.,JIMÉNEZ, C. et AZAR, M., 2016. Climate change and building ageing impact on building energy performance and mitigation measures application: A case study in Turin, northern Italy. In : *Building and Environment*. 2016. Vol. 102, p. 13-25. DOI 10.1016/j.buildenv.2016.03.003. Scopus

WALKER, W. E.,HARREMOËS, P.,ROTMANS, J.,SLUIJS, J. P. van der,ASSELT, M. B. A. van,JANSSEN, P. et KRAUSS, M. P. K. von, 2003. Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. In : *Integrated Assessment*. 1 mars 2003. Vol. 4, n° 1, p. 5-17. DOI 10.1076/iaij.4.1.5.16466.

WANG, H.,JIAO, L. et YAO, X., 2015. Two_Arch2: An Improved Two-Archive Algorithm for Many-Objective Optimization. In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. août 2015. Vol. 19, n° 4, p. 524-541. DOI 10.1109/TEVC.2014.2350987.

WANG, L.,MATHEW, P. et PANG, X., 2012. Uncertainties in energy consumption introduced by building operations and weather for a medium-size office building. In : *Energy and Buildings*. 1 octobre 2012. Vol. 53, p. 152-158. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.06.017.

WEAVER, C. P.,LEMPERT, R. J.,BROWN, C.,HALL, J. A.,REVELL, D. et SAREWITZ, D., 2013. Improving the contribution of climate model information to decision making: the value and demands of robust decision frameworks. In : *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2013. Vol. 4, n° 1, p. 39-60. DOI 10.1002/wcc.202.

WEIDEMA, B., 1998. New developments in the methodology for LCA. In : *Proceedings of the 3rd International Conference on Ecobalance*. Tsukuba, Japan : s.n. 1998. p. 47-50.

WENDER, B. A.,FOLEY, R. W.,PRADO-LOPEZ, V.,RAVIKUMAR, D.,EISENBERG, D. A.,HOTTLE, T. A.,SADOWSKI, J.,FLANAGAN, W. P.,FISHER, A.,LAURIN, L.,BATES, M. E.,LINKOV, I.,SEAGER, T. P.,FRASER, M. P. et GUSTON, D. H., 2014. Illustrating Anticipatory Life Cycle Assessment for Emerging Photovoltaic Technologies. In : *Environmental Science & Technology*. 16 septembre 2014. Vol. 48, n° 18, p. 10531-10538. DOI 10.1021/es5016923.

WHEELER, J., 1992. Cité dans Scientific American, The New Challenges. In : *Scientific American*. décembre 1992. Vol. 267, n° 6, p. 20. JSTOR

WOLPERT, D. H. et MACREADY, W. G., 1997. No free lunch theorems for optimization. In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. avril 1997. Vol. 1, n° 1, p. 67-82. DOI 10.1109/4235.585893.

WORTMANN, T. et NANNICINI, G., 2017. Introduction to Architectural Design Optimization. In : *City Networks* [en ligne]. S.l. : Springer, Cham. Springer Optimization and Its Applications. p. 259-278. [Consulté le 5 avril 2018]. ISBN 978-3-319-65336-5. Disponible à l'adresse : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-65338-9_14.

XIN-SHE YANG, 2010. Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications. Wiley. S.l. : s.n. ISBN 978-0-470-58246-6.

XU, W.,CHONG, A.,KARAGUZEL, O. T. et LAM, K. P., 2016. Improving evolutionary algorithm performance for integer type multi-objective building system design optimization. In : *Energy and Buildings*. 1 septembre 2016. Vol. 127, p. 714-729. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.06.043.

YU, H.,YANG, W. et LI, Q., 2019. Multi-objective optimization of building's life cycle performance in early design stages. In : *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. septembre 2019. Vol. 323, p. 012116. DOI 10.1088/1755-1315/323/1/012116.

YU, Z. (Jerry),CHEN, J.,SUN, Y. et ZHANG, G., 2016. A GA-based system sizing method for net-zero energy buildings considering multi-criteria performance requirements under parameter uncertainties. In : *Energy and Buildings*. 1 octobre 2016. Vol. 129, p. 524-534. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.08.032.

ZAMAGNI A.,BUTTOL P.,PORTA P.L.,BUONAMICI R.,MASONI P.,GUINÉE J. et EKVALL T., 2008. *CALCAS WP5-D7: Critical review of current research needs and limitations related to ISO-LCA practice* [en ligne]. S.l. CALCAS (Co-ordination Action for innovation in Life-Cycle Analysis for Sustainability). Disponible à l'adresse : https://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/calcas_report_d7.pdf.

ZHANG, Q. et LI, H., 2007. MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. In : *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. décembre 2007. Vol. 11, n° 6, p. 712-731. DOI 10.1109/TEVC.2007.892759.

ZIRNGIBL, J., 2014. Nearly Zero Energy Buildings (nZEB) in the CEN draft standard. In : *REHVA Journal*. mai 2014. n° Issue 3, p. 4.

ANNEXES

Annexe A. Compositions des variantes constructives

Les compositions des parois spécifiques aux variantes du système constructifs sont données dans la suite.

Variante B-EPS

Tableau A.1 – Toiture terrasse

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
EPS-F (Polystyrène expansé)	25.0	0.031	25	0.383	0.12	**8.06**
Béton lourd	25.0	1.750	2300	0.256	7.00	**0.14**
Total					**0.12**	**8.21**

Tableau A.2 – Plancher intermédiaire sur vide sanitaire

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Carrelage	0.5	1.700	2300	0.194	340.00	**0.00**
Béton lourd	25.0	1.750	2300	0.256	7.00	**0.14**
XPS Top 30	25.0	0.036	30	0.403	0.14	**6.94**
Total					**0.14**	**7.09**

Tableau A.3 – Plancher combles

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
EPS-F (Polystyrène expansé)	25.0	0.031	25	0.383	0.12	**8.06**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Total					**0.12**	**8.18**

Tableau A.4 – Plancher bas sur terre-plein

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Sable et gravier	5.0	2.000	1950	0.253	40.00	**0.03**
XPS Top 30	25.0	0.036	30	0.403	0.14	**6.94**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Laine de roche	0.2	0.041	25	0.256	20.50	**0.05**
Carrelage	0.5	1.700	2300	0.194	340.00	**0.00**
Total					**0.14**	**7.14**

Tableau A.5 – Mur intérieur au RDC sur vide sanitaire

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Béton lourd	25.0	1.750	2300	0.256	7.00	**0.14**
EPS-F (Polystyrène expansé)	25.0	0.031	25	0.383	0.12	**8.06**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.12**	**8.35**

Tableau A.6 – Mur extérieur des combles

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit extérieur	4.0	1.150	1700	0.278	28.75	**0.03**
EPS-F (Polystyrène expansé)	25.0	0.031	25	0.383	0.12	**8.06**
Brique pleine de 21cm	21.0	1.050	1700	0.220	5.00	**0.20**
Total					**0.12**	**8.30**

Tableau A.7 – Mur extérieur du garage

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit extérieur	4.0	1.150	1700	0.278	28.75	**0.03**
EPS-F (Polystyrène expansé)	10.0	0.031	25	0.383	0.31	**3.23**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.29**	**3.40**

Tableau A.8 – Mur extérieur

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit extérieur	4.0	1.150	1700	0.278	28.75	**0.03**
EPS-F (Polystyrène expansé)	25.0	0.031	25	0.383	0.12	**8.06**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.12**	**8.24**

Variante B-LDR

Tableau A.9 – Mur extérieur B-LDR

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit extérieur	4.0	1.150	1700	0.278	28.75	**0.03**
Panneau laine de roche	25.0	0.036	132	0.286	0.14	**6.94**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.14**	**7.12**

Tableau A.10 – Mur extérieur du garage B-LDR

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit extérieur	4.0	1.150	1700	0.278	28.75	**0.03**
Panneau laine de roche	10.0	0.036	132	0.286	0.36	**2.78**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.34**	**2.96**

Tableau A.11 – Mur extérieur des combles B-LDR

Composante : Simple	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit extérieur	4.0	1.150	1700	0.278	28.75	**0.03**
Panneau laine de roche	25.0	0.036	132	0.286	0.14	**6.94**
Brique pleine de 21cm	21.0	1.050	1700	0.220	5.00	**0.20**
Total					**0.14**	**7.18**

Tableau A.12 – Mur extérieur du garage B-LDR

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Béton lourd	25.0	1.750	2300	0.256	7.00	**0.14**
Panneau laine de roche	25.0	0.036	132	0.286	0.14	**6.94**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.14**	**7.23**

Tableau A.13 – Plancher des combles B-LDR

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Laine de roche	25.0	0.041	25	0.256	0.16	**6.10**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Total					**0.16**	**6.21**

Variante B-LDR

Tableau A.14 – Plancher extérieur B-LDV

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Bois très léger	2.5	0.120	350	0.756	4.80	**0.21**
Lame d'air 255	2.5	0.159	1	0.340	6.25	**0.16**
Laine de verre Reha	25.0	0.036	20	0.256	0.14	**6.94**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.13**	**7.46**

Tableau A.15 – Mur extérieur du garage B-LDV

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Bois très léger	2.5	0.120	350	0.756	4.80	**0.21**
Lame d'air 255	2.5	0.159	1	0.340	6.25	**0.16**
Laine de verre Reha	10.0	0.036	20	0.256	0.36	**2.78**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.30**	**3.29**

Tableau A.16 – Mur extérieur des combles B-LDV

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Bois très léger	2.5	0.120	350	0.756	4.80	**0.21**
Lame d'air 255	2.5	0.159	1	0.340	6.25	**0.16**
Laine de verre Reha	25.0	0.036	20	0.256	0.14	**6.94**
Brique pleine de 21cm	21.0	1.050	1700	0.220	5.00	**0.20**
Total					**0.13**	**7.51**

Tableau A.17 – Plancher des combles B-LDV

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Laine de verre Reha	25.0	0.036	20	0.256	0.14	**6.94**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Total					**0.14**	**7.06**

Variante B-FDB

Tableau A.18 – Mur extérieur B-FDB

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit extérieur	4.0	1.150	1700	0.278	28.75	**0.03**
Panneau fibre de bois Reha	25.0	0.045	200	0.583	0.18	**5.56**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.17**	**5.73**

Tableau A.19 – Mur extérieur du garage B-FDB

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit extérieur	4.0	1.150	1700	0.278	28.75	**0.03**
Panneau fibre de bois Reha	10.0	0.045	200	0.583	0.45	**2.22**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.42**	**2.40**

Tableau A.20 – Mur extérieur des combles B-FDB

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit extérieur	4.0	1.150	1700	0.278	28.75	**0.03**
Panneau fibre de bois Reha	25.0	0.045	200	0.583	0.18	**5.56**
Brique pleine de 21cm	21.0	1.050	1700	0.220	5.00	**0.20**
Total					**0.17**	**5.79**

Tableau A.21 – Mur intérieur RDC sur vide sanitaire B-FDB

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Béton lourd	25.0	1.750	2300	0.256	7.00	**0.14**
Panneau fibre de bois Reha	25.0	0.045	200	0.583	0.18	**5.56**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.17**	**5.84**

Tableau A.22 – Plancher des combles B-FDB

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Laine de bois vrac Reha	25.0	0.040	40	0.583	0.16	**6.25**
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	**0.11**
Total					**0.16**	**6.36**

Variante OB-P

Tableau A.23 – Composants du mur extérieur du garage OB-P

Composante	Taux
OB-P Mur extérieur Garage 1	**15.00%**
OB-P Mur extérieur Garage 2	**85.00%**

Tableau A.24 – OB-P Mur extérieur Garage 1

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit à la chaux	3.0	0.700	1400	0.280	23.33	**0.04**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Bois lourd	12.0	0.230	650	0.667	1.92	**0.52**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**1.11**	**0.90**

Tableau A.25 – OB-P Mur extérieur Garage 2

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit à la chaux	3.0	0.700	1400	0.280	23.33	**0.04**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Panneau fibre de bois Reha	12.0	0.045	200	0.583	0.37	**2.67**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.33**	**3.05**

Tableau A.26 – Composants du mur extérieur des combles OB-P

Composante	Taux
OB-P Mur extérieur Combles 1	**15.00%**
OB-P Mur extérieur Combles 2	**85.00%**

Tableau A.27 – OB-P Mur extérieur Combles 1

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit à la chaux	3.0	0.700	1400	0.280	23.33	**0.04**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Bois lourd	37.0	0.230	650	0.667	0.62	**1.61**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.50**	**1.99**

Tableau A.28 – OB-P Mur extérieur Combles 2

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit à la chaux	3.0	0.700	1400	0.280	23.33	**0.04**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Paille compressée	37.0	0.065	120	0.389	0.18	**5.69**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.16**	**6.07**

Tableau A.29 – Composants du mur intérieur du RDC sur VS OB-P

Composante	Taux
OB-P Mur intérieur du RDC sur VS 1	**15.00%**
OB-P Mur intérieur du RDC sur VS 2	**85.00%**

Tableau A.30 – OB-P Mur intérieur du RDC sur VS 1

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit à la chaux	3.0	0.700	1400	0.280	23.33	**0.04**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Bois lourd	37.0	0.230	650	0.667	0.62	**1.61**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.50**	**1.99**

Tableau A.31 – OB-P Mur intérieur du RDC sur VS 2

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit à la chaux	3.0	0.700	1400	0.280	23.33	**0.04**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Paille compressée	37.0	0.065	120	0.389	0.18	**5.69**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.16**	**6.07**

Tableau A.32 – Composants du plancher des combles OB-P

Composante	Taux
OB-P Plancher Combles 1	**15.00%**
OB-P Plancher Combles 2	**85.00%**

Tableau A.33 – OB-P Plancher Combles 1

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Paille compressée	30.0	0.065	120	0.389	0.22	**4.62**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Bois lourd	15.0	0.230	650	0.667	1.53	**0.65**
Placoplatre BA 13	1.3	0.325	850	0.222	25.00	**0.04**
Total					**0.18**	**5.62**

Tableau A.34 – OB-P Plancher Combles 2

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Paille compressée	30.0	0.065	120	0.389	0.22	**4.62**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Lame d'air OB	15.0	0.100	1	0.340	0.67	**1.50**
Placoplatre BA 13	1.3	0.325	850	0.222	25.00	**0.04**
Total					**0.15**	**6.46**

Tableau A.35 – Composants du plancher intermédiaire sur VS OB-P

Composante	Taux
OB Plancher intermédiaire sur VS 1	**15.00%**
OB Plancher intermédiaire sur VS 2	**85.00%**

Tableau A.36 – OB-P Plancher intermédiaire sur VS 1

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Mortier	5.0	1.150	2000	0.233	23.00	**0.04**
Fibre de bois	2.0	0.150	800	0.580	7.50	**0.13**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Bois lourd	35.0	0.230	650	0.667	0.66	**1.52**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Total					**0.50**	**2.01**

Tableau A.37 – OB-P Plancher intermédiaire sur VS 2

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Mortier	5.0	1.150	2000	0.233	23.00	**0.04**
Fibre de bois	2.0	0.150	800	0.580	7.50	**0.13**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Lame d'air OB	10.0	0.100	1	0.340	1.00	**1.00**
Laine de bois vrac Reha	25.0	0.040	40	0.583	0.16	**6.25**
OB - Panneau OSB	**2.0**	**0.130**	**650**	**0.470**	**6.50**	**0.15**

Tableau A.38 – Composants de la toiture terrasse OB-P

Composante	Taux
OB-P Toiture terrasse 1	**15.00%**
OB-P Toiture terrasse 2	**85.00%**

Tableau A.39 – OB-P Toiture terrasse 1

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
EPS-F (Polystyrène expansé)	25.0	0.031	25	0.383	0.12	**8.06**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Bois lourd	20.0	0.230	650	0.667	1.15	**0.87**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Placoplatre BA 13	1.3	0.325	850	0.222	25.00	**0.04**
Total					**0.11**	**9.28**

Tableau A.40 – OB-P Toiture terrasse 2

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
EPS-F (Polystyrène expansé)	25.0	0.031	25	0.383	0.12	**8.06**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Lame d'air OB	15.0	0.100	1	0.340	0.67	**1.50**
Fibre de bois	5.0	0.150	800	0.580	3.00	**0.33**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Placoplatre BA 13	1.3	0.325	850	0.222	25.00	**0.04**
Total					**0.10**	**10.25**

Tableau A.41 – Composants du mur extérieur OB-P

Composante	Taux
OB-P Mur extérieur 1	**85.00%**
OB-P Mur extérieur 2	**15.00%**

Tableau A.42 – OB-P Mur extérieur 1

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit à la chaux	3.0	0.700	1400	0.280	23.33	**0.04**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Paille compressée	37.0	0.065	120	0.389	0.18	**5.69**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.16**	**6.07**

Tableau A.43 – OB-P Mur extérieur 2

Matériaux	Épaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m².K)	R (m².K)/W
Enduit à la chaux	3.0	0.700	1400	0.280	23.33	**0.04**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Bois lourd	37.0	0.230	650	0.667	0.62	**1.61**
OB - Panneau OSB	2.0	0.130	650	0.470	6.50	**0.15**
Plâtre courant	1.0	0.350	1000	0.222	35.00	**0.03**
Total					**0.50**	**1.99**

Annexe B. Description des catégories d'indicateurs

Acidification : cette catégorie concerne l'émission de polluants chimiques qui augmentent l'acidité de l'eau et des sols due à la concentration en ion d'hydrogène. Elle se produit suite au dépôt de polluants depuis l'atmosphère tels que les oxides d'azote (NO_x), le dioxide de sulfure (SO_2) et l'ammoniac (NH_3).

Demande cumulative d'énergie : la consommation d'énergie primaire peut être calculée par le biais du pouvoir calorifique inférieur ou supérieur et *via* des facteurs de caractérisation pour l'uranium et les énergies renouvelables.

Déchets produits : cette catégorie correspond à des flux d'inventaire liés aux déchets inertes.

Déchet radioactifs : cette catégorie rassemble des flux d'inventaire liés aux déchets radioactifs généralement liés à la production d'électricité d'origine nucléaire.

Eau utilisée : au niveau midpoint l'indicateur prend en compte les différents flux d'eau consommés dont la ressource est limitée (nappe phréatique, rivière). La méthode d'Impact World+ (Bulle et al., 2019) prend également en compte la quantité d'eau évaporée lors du refroidissement industriel (particulièrement élevé dans la production d'énergie d'origine nucléaire).

Effet de serre : cette catégorie évalue l'effet des gaz à effet de serre sur le forçage radiatif de l'atmosphère. L'augmentation du forçage radiatif a pour conséquence un réchauffement global de l'atmosphère. La hausse des températures a engendre des dommages au niveau *endpoint* sur la santé humaine (augmentation des cas de paludisme, malnutrition) et les écosystèmes (disparition d'espèces et changements dans la productivité de la biomasse).

Effets respiratoires : les effets respiratoires sont causés par des concentrations élevées en particules inorganiques dans l'air ambiant causées par l'émission directe de particules ou l'émission indirecte. Cette émission indirecte provient de l'émission de NO_x et de SO_2 qui créent des aérosols azotés et sulfatés. Les particules se mesure selon leur diamètre : PM_{10} pour les particules d'un diamètre de moins de 10 µm, $PM_{2.5}$ pour les particules d'un diamètre de moins de 2,5 µm, et $PM_{0.1}$ pour celles d'un diamètre de moins de 0,1 µm. Les particules les plus fines ont les effets les plus nocifs sur la santé.

Eutrophisation : l'eutrophisation consiste en l'accumulation de nutriments, généralement de l'azote et du phosphate, dans un compartiment terrestre ou aquatique. L'eutrophisation terrestre peut engendrer la prolifération de certaines plantes. L'eutrophisation aquatique cause la prolifération d'algues qui peuvent par la suite asphyxier le milieu aquatique et empêcher la lumière de la traverser avec des conséquences sur la disparition d'espèces qui vivent dans le milieu, la décomposition des algues au fond du milieu et leur décomposition par l'activité bactériologique avec une possible émission de gaz à effet de serre.

Destruction de l'ozone stratosphérique : la couche est essentielle car elle protège des rayons UV-B de plus faible longueur d'onde provenant du rayonnement solaire. Ces rayons UV-B peuvent avoir des conséquences sur la formation de cancer de la peau, le vieillissement prématuré et le système immunitaire. La couche d'ozone peut être détruite par l'émission de gaz destructeur de l'ozone comme les chlorofluorocarbones (CFC) et les hydrochlorofluorocarbones (HCFC).

L'occupation des sols : cette catégorie reflète les dommages causés aux écosystèmes par l'occupation des sols. Elle se caractérise par le maintien d'une surface dans un certain état (urbain, champ agricole, forêt) pendant une certaine durée.

Production d'ozone photochimique : l'émission de composés organiques volatiles et de d'oxides d'azote (NO_x) cause des réactions chimiques dans la troposphère qui produit de l'ozone nocif pour le système respiratoire et pour la végétation.

Annexe C. Technologies de production du modèle de système électrique

Tableau C.44 – Technologies de production du modèle de système électrique (partie 1)

Nom technologie	Description	Inventaire de cycle de vie ecoinvent 3.4
Charbon	Centrales à charbon	electricity production hard coal, FR
Cogé fioul	Cogénération au fioul	electricity production, oil
Cogé gaz	Cogénération au gaz	heat and power co-generation, natural gas, 1MW electrical, lean burn
EnR thermique	énergie thermique issue de la combustion de déchets, de biomasse et de biogaz	electricity, from municipal waste incineration to generic market for electricity, medium voltage, FR (47,4 %) heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014, high voltage, FR (30,6 %) heat and power co-generation, biogas, gas engine, high voltage, FR (22 %)
Éolien	production d'électricité éolienne terrestre et marine	electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore, FR
Gaz	centrales à gaz à cycle combiné en grande majorité et centrales à gaz conventionnelle	electricity production, natural gas, combined cycle power plant, FR (96 %) electricity production, natural gas, conventional power plant, FR (4 %)

Hydro éclusé	Production modulable d'électricité d'hydraulique éclusé L'hydrolien est assimilé à cette fiche par manque de données.	electricity production, hydro, run-of-river, FR
Hydro lac	Production modulable d'électricité d'hydraulique de lac	electricity production, hydro, reservoir, alpine region, FR
Hydro fil de l'eau	Production fatale d'électricité par centrale hydrauliques au fil de l'eau	electricity production, hydro, run-of-river, FR
Nucléaire	Centrales nucléaires	electricity production, nuclear, pressure water reactor, FR

Tableau C.45 – Technologies de production du modèle de système électrique (partie 2)

Nom technologie	Description	Inventaire de cycle de vie ecoinvent 3.4
Pointe	Production de pointe à base de turbine à combustion au fioul et au gaz	electricity production, oil, FR (65 %) electricity production, natural gas, 10MW, RoW (35 %)
Solaire PV 2020	centrales solaires PV et panneaux solaires PV domestiques. Des données d'inventaire mises à jour sont utilisées à 50 %.	electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si, FR (37,5 % initiale, 37,5 % MaJ 2020) electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof

		installation, multi-Si, panel, mounted (10 % initiale, 10 % MaJ 2020) electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted (2,5 % initiale, 2,5 % MaJ 2020)
STEP	impact associé à l'infrastucture et à l'électricité qui a été stockée en comptant 15 % de pertes	electricity production, hydro, reservoir, alpine region, FR
Import 2020	Le mix des import par Pays. Les mix des imports futurs utilisent ces mêmes fiches dans les proportions qui sont indiquées dans la section 4.3.2.	electricity, high voltage, import from BE (32 %) electricity, high voltage, import from DE (19 %) electricity, high voltage, import from ES (14 %) electricity, high voltage, import from GB (7 %) electricity, high voltage, import from IT (2 %) electricity, high voltage, import from CH (26 %) electricity, high voltage, import from IE (0 %)

Tableau C.46 – Technologies de production du modèle de système électrique (partie 3)

Nom technologie	Description	Inventaire de cycle de vie ecoinvent 3.4
Solaire PV 2035	centrales solaires PV et panneaux solaires PV domestiques. Des données d'inventaire mises à jour sont utilisées à 100 %.	electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si, FR (75 % MaJ 2020) electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted (20 % MaJ 2020) electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted (5 % MaJ 2020)

Annexe D. Capacités installées des mix électriques

Scénario	Année	Eolien terrestre	Eolien marin	Solaire PV	EnR Thermique	Nucléaire	Cogé Gaz	Cogé Fioul	Charbon	Gaz	Pointe	Hydro Lac	Hydro Eclusé	Hydro Fil	Hydro lien	STEP	Turbinage	Import	Export
Base	*2020*	17890	0	10010	2070	61370	5260	0	2340	6230	3240	10501	4200	6826	0	4293	3100	21000	27000
Base	*2021*	19790	0	12460	2100	61370	5210	0	1760	6690	3140	10509	4204	6831	0	4296	3300	21000	27000
Base	*2022*	21710	480	14900	2120	61370	5160	0	0	6690	3040	10517	4207	6836	0	4300	3500	21000	27000
Base	*2023*	22682	2418	17350	2150	63020	5110	0	0	6690	2940	10525	4210	6841	0	4303	3700	21000	27000
Base	*2024*	25086	2914	20350	2170	63020	5010	0	0	6690	2840	10558	4223	6863	0	4316	3900	21000	27000
Base	*2025*	27400	3000	23350	2200	63020	4960	0	0	6690	2740	10590	4236	6884	0	4330	4100	21000	27000
Ampère	*2025*	30163	4977	23660	2910	54890	4810	0	0	6690	2360	10371	4148	6741	100	4240	4500	21000	27000
Ampère	*2030*	41332	10008	35960	3480	48520	4810	0	0	6690	2360	10371	4148	6741	800	4240	2500	27000	32500
Ampère	*2035*	52331	15009	48460	4080	48500	4350	0	0	6690	2160	10371	4148	6741	3000	4240	2500	27500	33000
Hertz	*2025*	25235	4005	19660	2710	48530	4810	0	0	7240	9030	10371	4148	6741	100	4240	6000	17000	22500
Hertz	*2030*	32733	7507	27660	3090	39100	4810	0	0	7240	11250	10371	4148	6741	600	4240	6000	22500	27000
Hertz	*2035*	40232	10008	35660	3490	39100	4350	0	0	7800	11050	10371	4148	6741	1000	4240	6000	22500	27000
Volt	*2025*	25235	4005	19660	2710	61230	4010	0	0	6690	2360	10371	4148	6741	100	4240	2500	21000	27000
Volt	*2030*	32733	7507	27660	3090	57600	2010	0	0	6690	2360	10371	4148	6741	600	4240	2500	27000	32500
Volt	*2035*	40232	10008	35660	3490	54900	1150	0	0	6690	2160	10371	4148	6741	1000	4240	2500	27500	33000
Watt	*2025*	30334	5006	23660	2910	43110	7210	0	0	7800	5250	10371	4148	6741	100	4240	6000	17000	22500
Watt	*2030*	41332	10008	35960	3480	19070	8410	0	0	8350	13470	10778	4311	7005	800	4406	6000	22500	27000
Watt	*2035*	52331	15009	48460	4080	7640	7950	0	0	13130	13270	11184	4474	7270	3000	4572	6000	22500	27000

Figure D.1 – Capacités installées considérées pour chaque année et scénario (RTE, 2017)

Annexe E. Impact environnementaux des technologies de production d'électricité

Les impacts environnementaux d'un kWh d'électricité reçu au niveau du bâtiment sont donnés à la Figure E.1 et à la Figure E.2. Des pertes de 9 % sont comptées pour les technologies qui sont connectées au réseau haute tension, 6 % pour les technologies connectées au réseau moyenne tension (incinération de déchets) et 3 % pour les technologies connectées au réseau basse tension (solaire PV domestique).

UF = 1kWh consommé	Effet de serre	Eutrophisation	Energie	Destruction Ozone stratosphérique	Occupation des sols	Déchets	Ozone photochimique
Unité	kg CO_2 eq	kg PO_4 eq.	MJ	kg CFC-11 eq.	m^2.an	kg	kg d'éthylène eq.
Charbon	1,2E+00	4,7E-07	1,4E+01	1,9E-09	7,1E-03	4,8E-01	2,6E-03
Cogé fioul	1,0E+00	1,2E-04	1,6E+01	2,5E-07	1,8E-03	4,4E-02	5,6E-03
Cogé gaz	6,6E-01	7,8E-07	1,0E+01	9,2E-08	5,2E-04	2,6E-02	1,4E-03
Eolien	2,0E-02	8,3E-07	4,5E+00	1,5E-09	1,2E-03	5,1E-02	1,0E-04
Gaz	6,2E-01	7,5E-07	1,1E+01	1,2E-07	5,3E-04	2,6E-02	6,7E-04
Nucléaire	1,7E-02	4,3E-07	1,5E+01	7,2E-08	5,0E-04	3,6E-02	8,0E-05
EnR thermique	6,2E-02	1,6E-06	5,8E+00	5,9E-09	1,7E-01	2,4E-02	6,7E-04
Solaire pv	9,9E-02	5,2E-06	5,5E+00	9,2E-09	2,0E-02	9,0E-02	3,6E-04
Solaire pv 2020	7,9E-02	4,7E-06	3,1E+00	7,9E-09	1,9E-02	7,5E-02	3,0E-04
Solaire pv 2035	5,8E-02	4,2E-06	7,3E-01	6,5E-09	1,7E-02	6,0E-02	2,5E-04
HydroEcluse	7,9E-03	2,5E-07	4,2E+00	6,1E-10	3,2E-03	2,7E-02	4,5E-05
HydroFil	7,9E-03	2,5E-07	4,2E+00	6,1E-10	3,2E-03	2,7E-02	4,5E-05
HydroLac	1,1E-02	3,0E-07	4,2E+00	7,2E-10	2,5E-03	3,6E-02	4,9E-05
Import 2020	3,8E-01	1,8E-06	1,1E+01	4,3E-08	1,3E-02	1,5E-01	6,3E-04
Import_futur 2025 Haut	2,9E-01	1,1E-06	8,9E+00	3,7E-08	4,8E-02	7,9E-02	5,7E-04
Import_futur 2025 Median	2,8E-01	1,1E-06	8,9E+00	3,7E-08	4,9E-02	7,4E-02	5,6E-04
Import_futur 2030 Haut	2,7E-01	1,1E-06	8,5E+00	4,2E-08	4,5E-02	5,2E-02	5,1E-04
Import_futur 2030 Median	2,7E-01	1,0E-06	8,5E+00	4,2E-08	4,1E-02	5,6E-02	5,0E-04
Import_futur 2035 Haut	2,0E-01	1,0E-06	7,3E+00	2,8E-08	4,2E-02	5,0E-02	4,2E-04
Import_futur 2035 Median	2,2E-01	1,1E-06	7,6E+00	3,0E-08	4,2E-02	5,4E-02	4,3E-04
Pointe	9,6E-01	7,9E-05	1,5E+01	2,0E-07	1,4E-03	3,8E-02	4,4E-03
STEP	1,1E-02	3,0E-07	4,2E+00	7,2E-10	2,5E-03	3,6E-02	4,9E-05

Figure E.2 – Impacts environnementaux pour 1 kWh consommé depuis chaque technologie de production d'électricité

UF = 1kWh consommé	Eau	Acidification terrestre et aquatique	Déchets radioactifs	Effet respiratoire	Qualité des écosystèmes	Ressources	Santé humaine
Unité	L	kg SO_2 eq.	m^3	kg PM2.5 eq.	PDF.m^2.an	kg	DALY
Charbon	6,1E+01	1,3E-05	9,1E-10	3,2E-04	3,5E-01	1,4E-03	2,7E-06
Cogé fioul	7,3E+01	1,9E-05	4,2E-08	7,2E-04	4,1E-01	4,3E-03	3,0E-06
Cogé gaz	8,3E-01	1,6E-06	2,2E-09	3,7E-05	1,5E-01	2,2E-03	1,2E-06
Eolien	9,5E-01	3,3E-07	2,6E-10	1,7E-05	1,2E-02	3,5E-03	1,4E-07
Gaz	6,5E+01	1,0E-06	3,1E-10	2,6E-05	1,4E-01	2,4E-03	1,2E-06
Nucléaire	8,5E+01	3,1E-07	7,6E-08	2,4E-05	7,7E-03	1,1E-03	5,4E-07
EnR thermique	6,2E-01	9,9E-06	5,4E-10	3,3E-04	2,1E-01	1,2E-03	5,7E-07
Solaire pv	1,1E+01	1,1E-06	1,0E-09	6,3E-05	1,8E-01	3,5E-03	6,5E-07
Solaire pv 2020	8,4E+00	9,5E-07	7,3E-10	5,2E-05	1,7E-01	3,1E-03	5,4E-07
Solaire pv 2035	6,0E+00	7,5E-07	4,3E-10	4,1E-05	1,5E-01	2,8E-03	4,3E-07
HydroEcluse	3,1E-01	1,9E-07	1,0E-10	8,8E-06	1,5E-02	1,5E-03	7,4E-08
HydroFil	3,1E-01	1,9E-07	1,0E-10	8,8E-06	1,5E-02	1,5E-03	7,4E-08
HydroLac	4,1E-01	2,1E-07	1,3E-10	9,6E-06	1,1E-02	1,9E-03	3,7E-06
Import 2020	5,7E+01	3,1E-06	2,8E-08	9,6E-05	1,1E-01	2,0E-03	1,4E-06
Import_futur 2025 Haut	3,2E+01	2,8E-06	9,8E-09	9,5E-05	1,2E-01	2,4E-03	1,1E-06
Import_futur 2025 Median	3,1E+01	2,7E-06	1,0E-08	9,4E-05	1,2E-01	2,4E-03	1,1E-06
Import_futur 2030 Haut	3,1E+01	2,4E-06	8,0E-09	8,2E-05	1,1E-01	2,4E-03	1,0E-06
Import_futur 2030 Median	3,1E+01	2,5E-06	8,5E-09	8,5E-05	1,1E-01	2,4E-03	1,1E-06
Import_futur 2035 Haut	1,9E+01	2,5E-06	3,8E-09	8,4E-05	9,4E-02	2,6E-03	1,1E-06
Import_futur 2035 Median	2,2E+01	2,4E-06	4,2E-09	8,2E-05	9,8E-02	2,7E-03	1,1E-06
Pointe	7,2E+01	1,4E-05	2,8E-08	4,9E-04	3,3E-01	3,6E-03	2,5E-06
STEP	4,1E-01	2,1E-07	1,3E-10	9,6E-06	1,1E-02	1,9E-03	3,7E-06

Figure E.3 – Impacts environnementaux pour 1 kWh consommé depuis chaque technologie de production d'électricité

Annexe F. Quantitatif des composants du cas d'étude

Tableau F.47 – Quantitatif des composants du cas d'étude

Élément	Quantité	Unité	Élément	Quantité	Unité
Acier faiblement allié	3058	kg	Plâtre - plaque	6005	kg
Ballon de stockage ECS	300	L	Polyéthylène - étanchéité	107	kg
Béton B25	479960	kg	Polystyrène expansé	3743	kg
Béton pour fondation	51002	kg	Polystyrène extrudé	938	kg
Bois certifié - poutre	3072	kg	Pompe à Chaleur	4,40	kW
Brique	60071	kg	Porte bois extérieure - certifié	20	m²
Câble 3 conducteurs	1025	m	Porte bois intérieure - certifié	21	m²
Carrelage	2598	kg	PVC	45	kg
Cuivre	72	kg	Fenêtres PVC triple vitrage	56	m²
Enduit extérieur minéral	35216	kg	Système solaire PV intégré	33,3	m²
Gravier	29685	kg	Système solaire thermique (sans ballon)	4,60	m²
Laine de roche	10	kg	Unité de ventilation Avent E	1	unité

			97 120m3/h
Peinture solvant m2	2674	m²	

Annexe G. Anomalies climatiques issues des résultats du *morphing* climatique

Dans les tableaux suivants, les anomalies des variables climatiques (la différence entre le scénario futur et la période 1994-2008) obtenues par la méthode *morphing* sont comparées aux anomalies observées avec le modèle climatique régionalisé Aladin.

Tableau G.48 – Comparaison des anomalies, zone H1a (station de Trappes)

H1a (Trappes)	RCP45				RCP85			
	2031-2065		2066-2100		2031-2065		2066-2100	
	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY
Température max (°C)	+1,13	+1,13	+2,2	+2,2	+1,65	+1,65	+3,78	+3,78
Température moyenne (°C)	+1,09	+1,08	+2,16	+2,15	+1,33	+1,32	+3,43	+3,42
Température minimale (°C)	+1,02	+1,02	+2,09	+2,09	+1,01	+1,01	+3,08	+3,08
Rayonnement global (%)	+0,7	+1,83	+2,8	+4,41	+5,7	+8,59	+8,7	+12,5
Humidité relative (%)	-0,98	-1,4	-1,86	-2,4	-1,98	-2,6	-5,14	-6,6

Tableau G.49 – Comparaison des anomalies, zone H1b (station de Nancy)

H1b (Nancy)	RCP45				RCP85			
	2031-2065		2066-2100		2031-2065		2066-2100	
	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY
Température max (°C)	+0,24	+0,25	+1,5	+1,49	+0,98	+0,98	+2,88	+2,87
Température moyenne (°C)	+0,29	+0,29	+1,79	+1,79	+1,13	+1,13	+3,31	+3,31
Température minimale (°C)	+0,22	+0,22	+1,21	+1,21	+0,85	+0,85	+2,44	+2,44
Rayonnement global (%)	+3,60	+4,99	+8,60	+12,1	+5,60	+8,30	+11,7	+16,4
Humidité relative (%)	+0,29	+0,30	-0,78	-1,10	+1,21	+1,40	-3,52	-4,50

Tableau G.50 – Comparaison des anomalies, zone H1c (station de Mâcon)

H1c (Mâcon)	RCP45				RCP85			
	2031-2065		2066-2100		2031-2065		2066-2100	
	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY
Température max (°C)	+1,41	+1,39	+2,12	+2,12	+1,54	+1,54	+3,69	+3,68
Température moyenne (°C)	+1,2	+1,2	+2,14	+2,14	+1,24	+1,24	+3,72	+3,72
Température minimale (°C)	+1,56	+1,55	+2,12	+2,12	+1,82	+1,82	+3,62	+3,62
Rayonnement global (%)	+3,2	+5,08	+8,0	+11,8	+8,9	+12,7	+10,5	+14,9
Humidité relative (%)	+2,83	+3,5	-0,25	-0,5	+2,35	+2,9	-2,09	-2,8

Tableau G.51 – Comparaison des anomalies, zone H2a (station de Rennes)

H2a (Rennes)	RCP45				RCP85			
	2031-2065		2066-2100		2031-2065		2066-2100	
	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY
Température max (°C)	+0,84	+0,83	+1,52	+1,51	+1,02	+1,02	+3,33	+3,31
Température moyenne (°C)	+0,85	+0,85	+1,63	+1,63	+1,13	+1,13	+3,7	+3,7
Température minimale (°C)	+0,81	+0,81	+1,39	+1,39	+0,92	+0,92	+2,93	+2,93
Rayonnement global (%)	+0,2	+0,21	+3,0	+4,28	+2,5	+3,73	+7,3	+10,5
Humidité relative (%)	-0,1	-0,2	-0,28	-0,5	-0,6	-0,8	-3,54	-4,4

Tableau G.52 – Comparaison des anomalies, zone H2b (station de La Rochelle)

H2b (La Rochelle)	RCP45				RCP85			
	2031-2065		2066-2100		2031-2065		2066-2100	
	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY
Température max (°C)	+1,06	+1,06	+1,63	+1,64	+1,17	+1,16	+3,0	+3,0
Température moyenne (°C)	+0,89	+0,89	+1,68	+1,68	+0,91	+0,91	+3,3	+3,3
Température minimale (°C)	+1,21	+1,21	+1,59	+1,59	+1,37	+1,37	+2,73	+2,73
Rayonnement global (%)	-1,4	-1,33	+2,2	+4,48	-1,4%	-1,09	+6,5	+10,9
Humidité relative (%)	+0,73	+0,8	-2,07	-2,5	-0,1	-0,2	-2,84	-3,5

Tableau G.53 – Comparaison des anomalies, zone H2c (station d'Agen)

H2c (Agen)	RCP45				RCP85			
	2031-2065		2066-2100		2031-2065		2066-2100	
	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY
Température max (°C)	+1,19	+1,19	+1,93	+1,93	+1,25	+1,25	+3,31	+3,3
Température moyenne (°C)	+1,31	+1,31	+2,21	+2,21	+1,36	+1,36	+3,51	+3,51
Température minimale (°C)	+1,09	+1,09	+1,68	+1,68	+1,15	+1,15	+3,1	+3,1
Rayonnement global (%)	+3,5	+6,19	+7,8	+12,4	+5,3%	+9,28	+11,6	+18,3
Humidité relative (%)	-0,01	-0,1	-2,94	-3,8	-1,76	-2,4	-3,67	-4,7

Tableau G.54 – Comparaison des anomalies, zone H2d (station de Carpentras)

H2d (Carpentras)	RCP45				RCP85			
	2031-2065		2066-2100		2031-2065		2066-2100	
	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY
Température max (°C)	+0,77	+0,77	+2,01	+2,0	+1,2	+1,21	+3,45	+3,46
Température moyenne (°C)	+0,87	+0,87	+2,35	+2,35	+1,19	+1,19	+3,8	+3,8
Température minimale (°C)	+0,69	+0,69	+1,66	+1,66	+1,24	+1,24	+3,14	+3,14
Rayonnement global (%)	+3,3	+6,33	+2,3	+4,87	+4,7	+8,81	+3,1	+6,53
Humidité relative (%)	-0,5	-0,7	-2,02	-3,0	-0,92	-1,4	-2,38	-3,5

Tableau G.55 – Comparaison des anomalies, zone H2b (station de Nice)

H3 (Nice)	RCP45				RCP85			
	2031-2065		2066-2100		2031-2065		2066-2100	
	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY	Aladin	TRY
Température max (°C)	+0,84	+0,82	+1,62	+1,6	+1,3	+1,3	+3,28	+3,26
Température moyenne (°C)	+0,81	+0,81	+1,52	+1,52	+1,08	+1,08	+3,25	+3,25
Température minimale (°C)	+0,86	+0,86	+1,75	+1,75	+1,53	+1,53	+3,34	+3,34
Rayonnement global (%)	+2,7	+5,72	+3,7	+7,49	+1,8	+4,42	+5,6	+10,7
Humidité relative (%)	+0,02	0,0	+0,22	+0,3	+0,47	+0,7	-0,19	-0,3

TABLE DES FIGURES

Citation 1.1 – Abstract à propos de la première maison à l'énergie PV. Issu de Energy Research abstracts, vol 7 n°5, p.1286, 15 mars 1982. 9

Figure 1.2 – Positionnement des aspects environnementaux en phase de conception du bâtiment (Lamé et al. 2017) 14

Figure 1.3 - Relations entre la frontière physique du bâtiment et les réseaux d'énergie. Illustration des types de bilan (Sartori et al. 2012) 22

Figure 1.4 - Les différentes options de fourniture d'énergie renouvelable pour un bâtiment zéro-énergie connecté au réseau (Marszal et al., 2010) 23

Figure 1.5 – Principales étapes de l'ACV définie selon l'ISO 14040:2006 31

Figure 1.6 – Processus itératif de l'ACV. Figure traduite de *ICLD Handbook – General guide for LCA detailed guidance* (European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, 2010) 32

Figure 1.7 – Schéma illustratif des frontières d'un système d'étude 37

Figure 1.8 – Étapes et modules du cycle de vie d'un bâtiment selon la norme CSN EN 15978:2011 41

Figure 1.9 – ICV dynamique intra-annuelle des consommations d'électricité et du mix. Dans un exemple d'ICV inter-annuelle, les « émissions des technologies de production » seraient dynamiques pour décrire des évolutions technologiques (Su et al., 2019) 45

Figure 1.10 – Étapes de l'ACV de bâtiment 48

Figure 1.11 – Forçage radiatif instantané (a) et cumulé (b) de l'émission d'une masse unitaire de dioxyde de carbone et de méthane (Levasseur et al., 2010) 50

Figure 1.12 - Relation entre la quantité d'options de conception et la quantité de d'informations disponibles durant la phase de conception (Malmqvist et al. 2011) 55

Figure 1.13 - Espace des variables de décision (gauche) et espace des objectifs (droite). 58

Figure 1.14 – Illustration des relations de dominance entre solutions 59

Figure 1.15 – Illustration de la frontière de Pareto dans l'espace des objectifs Z 60

Figure 1.16 – Exemples de fronts de Pareto : mauvaise convergence et bonne diversité (gauche), bonne convergence et mauvaise diversité (centre), bonne convergence et bonne diversité (droite). Source : El-Ghazali Talbi (2009) 61

Figure 1.17 – Illustration des points idéal, de référence et Nadir, d'une solution de Pareto satisfaisante et de la frontière de Pareto 62

Figure 1.18 – Classification des algorithmes d'optimisation extrait de Xin-She Yang (2010) 66

Figure 1.19 – Non-linéarité entre l'émission de CO_2 du cycle de vie d'un bâtiment et l'épaisseur d'isolant. Source : Peuportier (2014) 72

Figure 1.20 - Répartition des solutions des surfaces de Pareto de différents algorithmes d'optimisation pour un problème test DTLZ2 (concave) à 3 fonctions objectif (Hadka – documentation de Platypus) 77

Figure 1.21 – Aires d'application de l'ACV d'après Weidema (1998) 86

Figure 1.22 – Sources d'incertitudes dans le cycle de vie réel d'un bâtiment et leur influence en ACV, partie 1 95

Figure 1.23 – Sources d'incertitudes dans le cycle de vie réel d'un bâtiment et leur influence en ACV, partie 2 96

Figure 1.24 – Schéma de principe de l'ACV de bâtiment et contextualisation des types d'incertitudes selon Björklund (2002) 98

Figure 1.25 – Front de Pareto d'une optimisation multicritère avec compromis entre variance (écart-type) et espérance (moyenne) (Beyer et Sendhoff, 2007) 104

Figure 2.1 – Illustration du modèle de système électrique tiré de Roux (2016) 123

Figure 2.2 – Schéma du principe du mix marginal GHG-P, tiré de Roux (2016) 125

Figure 2.3 – Illustration de la représentation d'un bâtiment en optimisation évolutionnaire, tiré de Recht (2016) 127

Figure 2.4 – Schéma de fonctionnement de NSGA-II 128

Figure 2.5 – Illustration du croisement à un point de coupure de la représentation du génome en une chaîne d'entiers 132

Figure 2.6 - Schéma illustratif des étapes de l'inventaire à la caractérisation des impacts au niveau des *midpoints* puis des *endpoints* 134

Figure 2.7 – Mécanismes environnementaux du changement climatique. Adapté de European Commission - Joint Research Centre (2011) 139

Figure 2.8 – Comparaison des impacts du système PV avant et après mise à jour 146

Figure 2.9 – Comparaison de l'intensité carbone d'un kWh produit par un système PV avec différentes hypothèses 148

Figure 2.10 – Impacts de différents procédés pour 1 kg de fluide frigorigène R134a 152

Figure 2.11 – Comparaison des impacts de fabrication et de fin de vie d'un système solaire PV. Unité fonctionnelle de 1 m² 159

Figure 2.12 – Comparaison des impacts de fabrication et de fin de vie d'un système solaire thermique. Unité fonctionnelle de 1 m² 159

Figure 2.13 – Comparaison des impacts de fabrication et de fin de vie d'une pompe à chaleur. Unité fonctionnelle de 1 kW 160

Figure 2.14 – Comparaison des impacts de fabrication et de fin de vie d'un ballon de stockage. Unité fonctionnelle de 1 L 160

Figure 2.15 – Comparaison de tirages aléatoires et de séquences de Sobol 162

Figure 2.16 – Vue architecturale et photos du cas d'étude situé à Plovdiv, Bulgarie 164

Figure 2.17 – Masque solaire vu depuis la façade Sud 165

Figure 2.18 - Plan de coupe, visualisation des étages en quinconce. En gris l'épaisseur d'isolant et en noir l'épaisseur de béton (VS = vide-sanitaire). 166

Figure 2.19 - Simplification des vitrages. Gauche : 17 fenêtres, droite : 9 fenêtres 170

Figure 2.20 - Zonage thermique. Rouge : zone jour, bleu : zone nuit, jaune : LNC étanches, vert : LNC non-étanches 171

Figure 2.21 - Diagramme de Sankey des besoins chauds de l'enveloppe 174

Figure 2.22 - Diagramme de Brager et taux de confort 175

Figure 2.23 – Détails des postes de consommation d'électricité, de la production et de la consommation nette et pourcentages de la consommation brute totale. 176

Figure 2.24 – Graphe radar des impacts totaux avec et sans prise en compte des fuites de fluide frigorigène 178

Figure 2.25 - Histogrammes des impacts par étapes du cycle de vie 179

Figure 2.26 – Contributions à l'effet de serre de l'étape de construction 180

Figure 2.27 – Contribution des postes aux émissions de GES de l'étape d'utilisation 181

Figure 2.28 – Émission de GES annuelle d'un kWh de différents usages de l'électricité et émission mensuelle d'un kWh provenant du mix électrique (ACV attributionnelle) 182

Figure 3.1 – Coût en € HT/m² des isolants en polystyrène en fonction de l'épaisseur 192

Figure 3.2 – Coûts d'un système PV d'une puissance de 150Wc/m² 193

Figure 3.3 – Évolution du front de Pareto du POM simple 194

Figure 3.4 – Évolution du front du POM simple avec un pas de 5 générations 195

Figure 3.5 – Évolution du bilan d'énergie des solutions optimales du POM simple en fonction du coût de construction 196

Figure 3.6 – Évolution des besoins de chauffage et de la production PV avec l'investissement dans les solutions du front du POM Simple 197

Figure 3.7 – Comparaison des émissions de GES moyennes des solutions optimales avec les émissions de la conception initiale 198

Figure 3.8 – Vue d'ensemble des variantes structurelles. Le type d'isolant et ses bornes inférieure et supérieure de variation sont indiqués dans les cases 201

Figure 3.9 – Coûts de fourniture des isolants en € HT/m² en fonction de leur épaisseur 203

Figure 3.10 – Graphe radar des impacts totaux des variantes du système constructif avec B-EPS comme référence 206

Figure 3.11 – Émission de GES par étape du cycle de vie des variantes du système constructif 207

Figure 3.12 – Illustration de la problématique du couplage des paramètres de conception dans une opération de croisement à un point de coupure 209

Figure 3.13 – Exemple du couplage de paramètres de conception et de l'extension des allèles associées aux compositions de la variante OB-P 210

Figure 3.14 – Représentation des hypervolumes exclusifs de solutions (bleu) par rapport à un point de référence (rouge) 211

Figure 3.15 – Évolution de l'hypervolume de trois POM 212

Figure 3.16 – Comparaison des fronts du POM Simple et du POM Complet 213

Figure 3.17 – Évolutions des besoins de chauffage, de la production PV et du bilan zéro-énergie/BEPOS en fonction du coût de construction des solutions des optimums locaux 215

Figure 3.18 – Carte de chaleur des épaisseurs d'isolant dans les solutions (zones 1-2) 217

Figure 3.19 - Carte de chaleur des épaisseurs d'isolant dans les solutions (zones 3-4) 218

Figure 3.20 – Répartition des types de vitrage parmi les solutions des zones d'optimum local 220

Figure 3.21 – Carte de chaleur du changement de surface vitrée par orientation dans les solutions des zones d'optimum local 221

Figure 3.22 – Masque visible depuis la fenêtre Ouest durant l'année 221

Figure 3.23 – Coordonnées parallèles pour la visualisation des solutions du front de Pareto global 223

Figure 3.24 – Coordonnées parallèles et choix de trois décideurs A, B et C dans une prise de décision *a posteriori* de l'optimisation multicritère 224

Figure 3.25 – Graphe radar des impacts environnementaux des solutions optimales A, B et C, et comparaison avec le cas initial 225

Figure 3.26 –Impacts de 1 kg de paille produite principalement et 1 kg de paille co-produite 228

Figure 3.27 – Graphe radar comparant la solution C (OB-P) incluant de la paille co-produite avec les solutions initiales des décideurs 228

Figure 3.28 – Part de l'usage direct des sols dans les dommages aux écosystèmes dans plusieurs variantes d'une maison 231

Figure 3.29 – Comparaison de variantes avec prise en compte de l'usage direct des sols 232

Figure 3.30 – Boîte à moustaches des coefficients horaire d'énergie primaire d'un kWh d'électricité de mix électriques simulés pour les années 2016 et 2020 234

Figure 3.31 – Contenu en énergie primaire d'un kWh d'électricité produit par différentes technologies d'après ecoinvent 3.4 et *CED* (Hischier et al., 2010) 235

Figure 3.32 – Variabilité mensuelle et journalière du coefficient d'énergie primaire 236

Figure 3.33 – Composition du mix électrique infra-journalier le 1er février et le 1er août de l'année 2020 simulée 237

Figure 3.34 – Évolution de l'hypervolume des fronts des POM basés sur la contrainte du bilan d'énergie finale et du bilan d'énergie primaire 239

Figure 3.35 – Comparaison des fronts locaux des POM avec bilan Ef et bilan Ep 239

Figure 3.36 – Comparaisons de la zone 2 des POM avec bilan Ef et avec bilan Ep 240

Figure 3.37 – Comparaisons de la zone 3 des POM avec bilan Ef et avec bilan Ep 240

Table des figures

Figure 4.1 – Cas d'incertitude épistémique rencontrés en modélisation 246

Figure 4.2 – Approche d'ACV prospective du bâtiment illustrée dans le cadre de l'ACV dynamique 253

Figure 4.3 – Zones climatiques dans la réglementation thermique 2012 (RT2012) 255

Figure 4.4 – Projection des scénarios RCP sur la différence de température globale avec la période 1986-2005 (source : Ed Hawkins) 257

Figure 4.5 – Ratio $\boldsymbol{\alpha}$ sur une année de référence de la période 1982-2018 261

Figure 4.6 – Illustration du décalage absolu en fonction des températures d'un jour j donné 263

Figure 4.7 – Température extérieure des données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 4.5 266

Figure 4.8 – Température extérieure des données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 8.5 267

Figure 4.9 – Anomalies mensuelles moyennes de la température extérieure des données issues du *morphing* par rapport aux données climatiques de la RT2012 pour la station météorologique de Trappes 268

Figure 4.10 – Température extérieure du mois d'août dans les scénarios RCP 4.5 et 8.5 269

Figure 4.11 – Rayonnement global horizontal des données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 4.5 271

Figure 4.12 – Rayonnement global horizontal des données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 8.5 272

Figure 4.13 – Humidité relative dans les données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 4.5 273

Figure 4.14 – Humidité relative dans les données issues du morphing appliqué à la station de Trappes (H1a), scénario RCP 8.5 274

Figure 4.15 – Capacités installées des scénarios des bilans prévisionnels 2017 et 2019 de RTE 279

Figure 4.16 – Composition des imports d'électricité à partir de scénarios d'interconnexion 280

Figure 4.17 – Intensité carbone de l'import de l'électricité en France selon les deux hypothèses d'évolution des interconnexions 283

Figure 4.18 – Moyenne annuelle de l'émission de GES des scénarios d'après les BP 2017 et 2019 de RTE 287

Figure 4.19 - Moyenne annuelle de l'émission de GES des scénarios d'après les résultats du modèle du système électrique 288

Figure 4.20 – Mix mensuels des scénarios de court terme issus du modèle 289

Figure 4.21 – Mix mensuels des scénarios Ampère et Hertz issus du modèle 290

Figure 4.22 – Mix mensuels des scénarios Volt et Watt issus du modèle 291

Figure 4.23 – Carte de chaleur de l'écart à la moyenne annuelle de l'intensité carbone d'un kWh d'électricité pour l'année 2020 292

Figure 4.24 – Carte de chaleur de l'écart à la moyenne annuelle de l'intensité carbone d'un kWh d'électricité pour l'année 2035 et les scénarios Ampère et Hertz 293

Figure 4.25 – Carte de chaleur de l'écart à la moyenne annuelle de l'intensité carbone d'un kWh d'électricité pour l'année 2035 et les scénarios Volt et Watt 294

Figure 4.26 – Évolution de la performance d'un système solaire PV par rapport à sa performance initiale avec deux taux de dégradation annuelle 298

Figure 4.27 – Illustration des scénarios de cycle de vie de l'approche prospective et comparaison avec l'approche usuelle de l'ACV de bâtiment 299

Figure 4.28 – Étapes et répartitions des calculs des années individuelles prospectives en optimisation multicritère robuste 300

Figure 5.1 – Fronts de Pareto de POM/POMR avec différentes contraintes zéro-énergie 306

Figure 5.2 – Hypervolumes des POM/POMR avec différentes contraintes zéro-énergie 306

Figure 5.3 – Besoins de chauffage, production d'électricité PV et bilan d'énergie finale de la 1ère année d'utilisation des POM/POMR avec différentes contraintes zéro-énergie. Zone 1 : béton et fibre de bois, zone 2 : béton et laine de roche, zone 3 : béton et laine de verre, zone 4 : ossature bois et paille 308

Figure 5.4 – Trajectoires prospectives du bilan d'énergie finale annuel 310

Figure 5.5 – Caractéristiques des cas de non-respect du bilan zéro-énergie 311

Figure 5.6 – Front de Pareto en 3D du POMR GES 315

Figure 5.7 – Front de Pareto du POMR GES représenté par paire de fonctions objectif 315

Figure 5.8 – Front de Pareto du POMR GES avec un gradient de couleur sur la valeur d'écart-type de l'émission de GES durant l'utilisation 316

Figure 5.9 – Front de Pareto 3D du POMR GES avec visualisation des groupes 317

Figure 5.10 – Représentation en 2D du front de Pareto du POMR GES selon la moyenne des émissions de GES et le coût de construction avec visualisation des groupes 318

Figure 5.11 – Front à deux dimensions extrait du front de Pareto 3D du POMR GES 320

Figure 5.12 – Solutions du front 2D du POMR GES, des décideurs du POM Complet et cas initial dans l'espace des objectifs prospectifs 322

Figure 5.13 – Solution robuste sélectionnée et comparaison avec la solution du POM Complet du décideur A et avec le cas initial 323

Figure 5.14 – Boîtes à moustaches des émissions de GES des années prospectives de l'étape d'utilisation pour les solutions A-R et A initiale 327

Figure 5.15 – Boîtes à moustache des émissions de GES totales prospectives pour les solutions A-R et A initiale 328

Figure 5.16 – ACV usuelle de la solution A initiale et de la solution AR 329

Figure 5.17 – Comparaison des impacts en ACV des solutions A initiale et A-R 330

Figure D.1 – Capacités installées considérées pour chaque année et scénario (RTE, 2017) 391

Figure E.2 – Impacts environnementaux pour 1 kWh consommé depuis chaque technologie de production d'électricité 392

Figure E.3 – Impacts environnementaux pour 1 kWh consommé depuis chaque technologie de production d'électricité 393

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 - Cadre de définition du NZEB selon (Sartori et al., 2012) 18

Tableau 1.2 – Exemple de cadre de prise de décision XLRM 102

Tableau 1.3 – Classification des critères de robustesse, adapté de (Kwakkel et Haasnoot, 2019) 104

Tableau 2.1 – Indicateurs d'impact et méthodes de caractérisation d'EQUER au démarrage de la thèse 120

Tableau 2.2 – Description résumée des différentes aires de protection 135

Tableau 2.3 – Catégories d'impact considérées au niveau *endpoint* dans la version initiale d'EQUER et dans l'implémentation d'Impact World+ 143

Tableau 2.4 – Nouveau jeu d'indicateurs d'impact basé sur Impact World+ 144

Tableau 2.5 – Contenu énergétique de différents produits 153

Tableau 2.6 – Taux de valorisation de la cogénération en incinération de déchets 153

Tableau 2.7 – Efficacité et substitution de procédés de recyclage 154

Tableau 2.8 – Fins de vie de plusieurs compositions 155

Tableau 2.9 – Composition et fin de vie du système solaire thermique 156

Tableau 2.10 - Composition et fin de vie de la pompe à chaleur 157

Tableau 2.11 - Composition et fin de vie du ballon de stockage 157

Tableau 2.12 - DJU fichier météorologique RT2012 H1a à Trappes 165

Tableau 2.13 - Détails de l'isolation de l'enveloppe 167

Tableau 2.14 - Taux de vitrage des façades 167

Tableau 2.15 - Ponts thermiques 169

Tableau 2.16 - Infiltrations d'air 169

Tableau 2.17 – Consommations et production PV du cas d'étude 176

Tableau 2.18 – Impacts/m².an du cycle de vie du cas d'étude 177

Tableau 3.1 – Espace de décision du problème d'optimisation initial 189

Tableau 3.2 - Aperçu de l'espace de décision du problème d'optimisation multicritère 190

Tableau 3.3 - Caractéristiques du double et du triple vitrage considérés dans l'espace de recherche 190

Tableau 3.4 – Données de coûts du cas de base en béton et polystyrène 192

Tableau 3.5 – Caractéristiques du problème d'optimisation initial 194

Tableau 3.6 – Systèmes constructifs, isolants et parement considérés dans l'espace de décision élargit 200

Tableau 3.7 – Coût en € HT/m² de la fourniture et de la main d'œuvre d'ouvrages structurels 202

Tableau 3.8 – Coûts en € HT/m² de la fourniture de parement et de la main d'œuvre pour l'isolation et le parement de parois verticale 203

Tableau 3.9 – Coûts en € HT/m² des travaux associés aux planchers et à la toiture terrasse 204

Tableau 3.10 – Caractéristiques principales des variantes du système constructif 205

Tableau 3.11 – Caractéristiques du problème d'optimisation complet 210

Tableau 3.12 – Caractéristiques générales des zones du front de Pareto global 213

Tableau 3.13 – Données d'impact des inventaires de la production principale de paille (« *stand-alone production* ») et de la paille co-produite 227

Tableau 3.14 – Facteurs de caractérisation de la transformation et de l'occupation des sols pour le cas d'étude 229

Tableau 3.15 – Influence de la prise en compte de l'usage direct des sols par variante 230

Tableau 3.16 – Caractéristiques du problème d'optimisation complet 238

Table des tableaux

Tableau 4.1 - Vue d'ensemble des scénarios RCP (Moss et al., 2010) 256

Tableau 4.2 – Comparaison des anomalies annuelles par rapport à la période 1994-2005 des données de *morphing* et des données du modèle RCM Aladin pour la zone H1a (Trappes) 265

Tableau 4.3 – DJU en base 18 des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à Trappes (H1a) 270

Tableau 4.4 – Hypothèses principales des scénarios prospectifs du BP 2017 de RTE 278

Tableau 4.5 – Hypothèse d'évolution des interconnexions dans chaque scénario de RTE 280

Tableau 4.6 – Hypothèses d'évolution des capacités installées des pays voisins par technologie de production 281

Tableau 4.7 – Scénario de capacités installées du TYNDP 2018 d'ENTSO-E sélectionnés 282

Tableau 4.8 – Données d'inventaire prospectives sur la production d'électricité PV du réseau 283

Figure 4.9 – Intensité carbone prospective de la production d'électricité PV du réseau 284

Tableau 4.10 – Erreurs moyennes pondérées du mix de production annuel issu du modèle par rapport aux données de RTE 286

Tableau 5.1 – Description du POMR avec contrainte zéro-énergie sur le bilan d'énergie finale moyen 305

Tableau 5.2 – Description du POMR avec contrainte zéro-énergie sur le bilan d'énergie finale moyen 305

Tableau 5.3 – Caractéristiques de la solution du POMR ZE-Q sélectionnée pour l'analyse de scénarios 309

Tableau 5.4 – Description du POMR GES 314

Tableau 5.5 – Description des groupes de solutions du front POMR GES 318

Tableau 5.6 – Description des solutions du front 2D extrait du front 3D du POMR GES 321

Tableau 5.7 – Description du cas initial et des solutions des décideurs du POM Complet du Chap. 3 dans l'espace des objectifs du POMR GES 322

Tableau 5.8 – Caractéristiques de la solution A initiale et de la solution A robuste 325

Tableau 5.9 – Paramètres de conception de la solution optimale robuste et comparaison avec le cas initial 326

Tableau A.1 – Toiture terrasse 371

Tableau A.2 – Plancher intermédiaire sur vide sanitaire 371

Tableau A.3 – Plancher combles 372

Tableau A.4 – Plancher bas sur terre-plein 372

Tableau A.5 – Mur intérieur au RDC sur vide sanitaire 372

Tableau A.6 – Mur extérieur des combles 372

Tableau A.7 – Mur extérieur du garage 373

Tableau A.8 – Mur extérieur 373

Tableau A.9 – Mur extérieur B-LDR 373

Tableau A.10 – Mur extérieur du garage B-LDR 374

Tableau A.11 – Mur extérieur des combles B-LDR 374

Tableau A.12 – Mur extérieur du garage B-LDR 374

Tableau A.13 – Plancher des combles B-LDR 374

Tableau A.14 – Plancher extérieur B-LDV 375

Tableau A.15 – Mur extérieur du garage B-LDV 375

Tableau A.16 – Mur extérieur des combles B-LDV 375

Tableau A.17 – Plancher des combles B-LDV 376

Tableau A.18 – Mur extérieur B-FDB 376

Tableau A.19 – Mur extérieur du garage B-FDB 376

Tableau A.20 – Mur extérieur des combles B-FDB 377

Tableau A.21 – Mur intérieur RDC sur vide sanitaire B-FDB 377

Tableau A.22 – Plancher des combles B-FDB 377

Tableau A.23 – Composants du mur extérieur du garage OB-P 377

Tableau A.24 – OB-P Mur extérieur Garage 1 378

Tableau A.25 – OB-P Mur extérieur Garage 2 378

Tableau A.26 – Composants du mur extérieur des combles OB-P 378

Tableau A.27 – OB-P Mur extérieur Combles 1 379

Tableau A.28 – OB-P Mur extérieur Combles 2 379

Tableau A.29 – Composants du mur intérieur du RDC sur VS OB-P 379

Tableau A.30 – OB-P Mur intérieur du RDC sur VS 1 380

Tableau A.31 – OB-P Mur intérieur du RDC sur VS 2 380

Tableau A.32 – Composants du plancher des combles OB-P 380

Tableau A.33 – OB-P Plancher Combles 1 381

Tableau A.34 – OB-P Plancher Combles 2 381

Tableau A.35 – Composants du plancher intermédiaire sur VS OB-P 381

Tableau A.36 – OB-P Plancher intermédiaire sur VS 1 382

Tableau A.37 – OB-P Plancher intermédiaire sur VS 2 382

Tableau A.38 – Composants de la toiture terrasse OB-P 382

Tableau A.39 – OB-P Toiture terrasse 1 383

Tableau A.40 – OB-P Toiture terrasse 2 383

Tableau A.41 – Composants du mur extérieur OB-P 383

Tableau A.42 – OB-P Mur extérieur 1 384

Tableau A.43 – OB-P Mur extérieur 2 384

Tableau C.44 – Technologies de production du modèle de système électrique (partie 1) 387

Tableau C.45 – Technologies de production du modèle de système électrique (partie 2) 388

Tableau C.46 – Technologies de production du modèle de système électrique (partie 3) 390

Tableau F.47 – Quantitatif des composants du cas d'étude 394

Tableau G.48 – Comparaison des anomalies, zone H1a (station de Trappes) 396

Tableau G.49 – Comparaison des anomalies, zone H1b (station de Nancy) 396

Tableau G.50 – Comparaison des anomalies, zone H1c (station de Mâcon) 397

Tableau G.51 – Comparaison des anomalies, zone H2a (station de Rennes) 397

Tableau G.52 – Comparaison des anomalies, zone H2b (station de La Rochelle) 398

Tableau G.53 – Comparaison des anomalies, zone H2c (station d'Agen) 398

Tableau G.54 – Comparaison des anomalies, zone H2d (station de Carpentras) 399

Tableau G.55 – Comparaison des anomalies, zone H2b (station de Nice) 399

RÉSUMÉ

La présence de nombreuses incertitudes en phase de conception peut nuire à la fiabilité d'une aide à la décision pour l'écoconception de bâtiments zéro-énergie basée la simulation énergétique dynamique, l'analyse de cycle de vie et l'optimisation multicritère. Ces travaux de thèse débutent par l'identification des principales sources d'incertitudes en ACV des bâtiments. Puis, une méthode de quantification d'incertitudes significatives est proposée avec l'objectif d'évaluer la robustesse d'une variante de conception dans un contexte prospectif et pour un coût calculatoire limité. Enfin, cette approche d'ACV dynamique prospective est intégrée à la fonction d'évaluation d'un algorithme d'optimisation génétique multicritère afin d'identifier des solutions de conception aux performances environnementales optimales et robustes dans le temps.

MOTS CLÉS

Analyse de cycle de vie, optimisation multicritère, bâtiment zéro-énergie, écoconception, aide à la décision robuste, incertitudes, prospective

ABSTRACT

Many uncertainties lie in the early design phase of a zero energy building which can affect the reliability of decision aid tools for ecodesign based on building performance simulation, life cycle analysis and multicriteria optimisation. This work starts with the identification of the main uncertainty sources in buildings LCA. A method for the quantification of influential uncertainties in buildings LCA is proposed with the aim to assess the robustness of a building design in a prospective context and with a limited computational cost. Then, this prospective dynamic LCA approach is integrated into the evaluation function of a genetic multicriteria optimisation algorithm in order to identify design solutions with environmental performances which are optimal and robust in the long term.

KEYWORDS

Life cycle analysis, multicriteria optimisation, zero energy building, ecodesign, robust decision making, uncertainties, prospective