



Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive

Thomas Recht

► To cite this version:

Thomas Recht. Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive. Eco-conception. Université Paris sciences et lettres, 2016. Français. NNT : 2016PSLEM024 . tel-01545437

HAL Id: tel-01545437

<https://pastel.hal.science/tel-01545437>

Submitted on 22 Jun 2017

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

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

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à MINES ParisTech

Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive

École doctorale n°432 SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR

Spécialité ÉNERGÉTIQUE ET PROCÉDÉS

Soutenue par **Thomas RECHT**
le 23 septembre 2016

Dirigée par **Bruno PEUPORTIER**
Co-encadrée par **Patrick SCHALBART**

COMPOSITION DU JURY :

M. Étienne WURTZ, Directeur de
recherche, CNRS, LEB, CEA-INES
Rapporteur

M. Frédéric WURTZ, Directeur de
recherche, CNRS, G2ELab, Grenoble-INP
Rapporteur

M^{me} Monika WOLOSZYN, Professeur
LOCIE, Université Savoie Mont-Blanc
Présidente

M^{me} Évelyne LUTTON, Directrice de
recherche, MIA, INRA
Membre du jury

M. Laurent MORA, Maître de conférences
I2M, Université de Bordeaux
Membre du jury

M. Bruno PEUPORTIER, Directeur de
recherche, CES, MINES ParisTech
Membre du jury

M. Patrick SCHALBART, Ingénieur de
recherche, CES, MINES ParisTech
Membre du jury



« Pourquoi doit-on défendre une forêt ? Parce qu'elle est précieuse et participe à l'équilibre de la biodiversité dont nous dépendons, mais aussi parce qu'elle est belle et que l'on ne peut se priver de la beauté de la vie. »

Pierre Rabhi

Remerciements

Une thèse, c'est un peu comme une « course de vélo ». L'effort est soutenu sur une longue durée, rythmé par l'alternance entre temps faibles et temps forts, et se finit (trop !) souvent par un sprint final effréné... La ligne d'arrivée franchie, les doutes qui ont pu nous habiter pendant la course s'estompent et laissent place à des émotions parfois difficiles à contenir. Les concessions faites les mois précédents prennent alors un sens, et on se dit que le jeu en valait la chandelle. Mais surtout, on se rappelle qu'au-delà d'une épreuve individuelle, le vélo est avant tout un sport collectif, et que nous devons notre arrivée à bon port aux personnes ayant partagé quelques coups de pédale (ou davantage !) avec nous sur les routes de cette aventure singulière.

Pour cette raison, je tiens en premier lieu à remercier Bruno Peuportier, le « directeur sportif », de m'avoir fait confiance et donné l'opportunité de travailler sur ce sujet de thèse. Merci également d'avoir su doser avec subtilité exigence et tolérance à mon égard, et de participer à rendre cette équipe ETB si particulière.

Je veux ensuite exprimer toute ma reconnaissance à Patrick Schalbart, le « coach sportif », pour son soutien sans faille et sa rigueur de tous les instants. Un grand merci pour tout ce que tu m'as apporté, autant scientifiquement qu'humainement. Et vive le Grand Est !

Je remercie aussi Étienne Wurtz et Frédéric Wurtz, « les commissaires de course », pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, et pour leurs remarques constructives. Merci également à Monika Woloszyn, rencontrée en 2012 à une époque où l'idée d'une thèse ne m'avait même pas encore traversé l'esprit, d'avoir présidé, quatre ans après, mon jury de soutenance (qui aurait pu l'imaginer !). Enfin, je tiens à remercier Évelyne Lutton et Laurent Mora de m'avoir fait l'honneur de participer à ce jury, mais aussi pour m'avoir aussi spontanément ouvert leurs portes et fait découvrir leur domaine d'expertise.

Je tiens à remercier IZUBA Énergies, les « mécaniciens », pour leur support informatique, avec une mention spéciale pour Stéphane Thiers. Merci pour tout le temps consacré !

Merci également à toutes les personnes de la communauté IBPSA et du réseau MEXICO avec qui j'ai pu échanger. Les discussions partagées avec ces « consultants extérieurs » ont en effet largement alimenté mes réflexions.

Un grand merci à présent à tous les membres de l'équipe ETB, les « coéquipiers » avec lesquels j'ai pu, au quotidien, rigoler ou déprimer (selon les périodes) de notre sort de doctorants, refaire le monde autour d'une ou plusieurs

Remerciements

(sic !) bières, regarder infatigablement les vidéos du zap de Spion, jouer des parties de ping-pong ou de tennis endiablées, se casser les dents sur un code peu coopératif, réaliser un push sur le CAOR à la semaine ski ou encore participer à l'acheminement illicite de quilles de Molky vers des terres insulaires... Outre tous ces souvenirs, j'ai pu grandir et m'enrichir à vos côtés, encore merci donc à Durca (dont le sourire fait trembler n'importe quelle journée de grisaille), Médéric (pour ses graphiques *R* aux petits oignons malgré l'urgence de mes demandes), Josselin (l'homme qui a modélisé la tour Eiffel sur Alcyone, ou encore dégusté tous les mets du pot de thèse de Fabio, sans limite le bonhomme quoi), Charles (pour ce travail collaboratif particulièrement agréable sur les algorithmes génétiques, ne renonce pas à résoudre $P = NP$!), Michaël (dont la personnalité est aussi pétillante qu'attachante, un véritable passionné capable de se réinventer chaque jour, un bonheur de le côtoyer), Éric (lanceur d'alerte au sujet de mes prédispositions génétiques, j'ai beau eu le nier un temps, j'appartiens effectivement à la deuxième catégorie de doctorants, celle où un état transcendantal est parfois mobilisé pour s'affranchir quasi complètement de sommeil durant les 10 derniers jours de rédaction, et pourtant, « on le savait »...), Fabio (guide inspirateur à mes débuts, adepte de la belle figure et vétéran de la capitalisation sur Atikteam, le tout doté d'un sens aiguisé du collectif), Maxime (grand frère spirituel malgré son jeune âge et ses origines douteuses – le Nord, quelle idée ! – blagues à part, je te dois beaucoup, un merci tout particulier, et longue vie à Roger !), Charlotte (alias « Chacha » en direct de Montreuil TPTB, véritable concentrateur d'idées carburant au 100 % renouvelable, les pauses ont une saveur particulière en sa présence), Guillaume (fan de l'« Ovalie », compagnon de route privilégié durant cette thèse, créateur du modèle Word du manuscrit, un mec au top, seul défaut : réticent au masochisme sportif), Marie-Lise (seule normande connue ayant su dompter, après des batailles épiques, la bête sauvage qu'est *novaEQUER*, son aide a été aussi précieuse que ses gâteaux délicieux), Simon (la force tranquille qui devrait prochainement inquiéter Ma Long, « In Simon We Trust »), Marie (« Frapinus Prime », digne héritière d'une dynastie royale de machines, merci pour le morceau de piano à ma soutenance), et enfin Mija (le p'tit nouveau, bonne chance pour ta thèse !).

Je souhaite aussi remercier plus largement toutes les personnes rencontrées au CES, en particulier Cynthia, Sahar, Rami, Haytham, Afif, et Jérémie pour m'avoir permis de m'intégrer si facilement au centre lorsque je suis arrivé en stage. Merci également au « staff technique » composé de Rocio, Joëlle, le reste de l'équipe administrative, et de Philippe pour l'informatique.

Une pensée aussi aux membres de l'association Dopamines dans laquelle j'ai pu faire de belles rencontres et passer de bons moments.

Remerciements

Merci aux Biocoop « Le Retour à La Terre », les « fournisseurs de produits diététiques » pour m'avoir approvisionné en si nombreux kg de fruits, légumes, et tartelettes en tout genre.

En réalisant le chemin parcouru, comment ne pas évoquer les différents « centres de formation ».

Dédicace tout d'abord au mastère BEPOS, qui a constitué le point d'entrée pour cette thèse mais aussi un terrain de jeu idéal pour me perfectionner dans la langue de Shakespeare - « Three months in Vancouver ! » - les bières belges, et la culture des kebabs (merci à Natacha, Mustafa, Didier, Arnaud, Thibaut, Pierrick et William, sans oublier Bernard !).

Une pensée ensuite à la Ginko Team (Julien, Mamat, Marie, Mektoub, Olivier... euh non, pas Olivier !) et en particulier à JOG, colloc' depuis trois ans, et qui a dû composer avec un oiseau de nuit dans l'appart, lors des dernières semaines de rédaction.

Dédicace aussi à l'ENSTIB, cette belle école du bois composée de mecs et de meufs sympas. J'espère avoir fait honneur à cet « ordre des bûcherons », et en particulier à la promo dont je fais partie : les « Gare aux 3A ». Une pensée toute spéciale à Amélie qui nous a quittés trop tôt, on t'embrasse. Je remercie Helisoa Rafidiarison, Romain Rémond, et Éric Mougel qui m'ont transmis leur enthousiasme de la recherche, et permis un premier contact avec.

Une pensée finale à deux « centres de formation » alsaciens. En premier lieu, le lycée Kléber pour m'avoir formé aux concours, sans réussite (sic !), durant trois ans. J'en retiens l'état d'esprit de Patrick Prignot (prof de maths en spé), prônant superbement l'amélioration continue, et l'une de ses phrases de début d'année : « vous avez le droit d'être mauvais en maths, mais pas de le rester ». En second lieu, le lycée Camille Sée (et sa section sport-étude cyclisme) dans lequel je me suis épanoui et construit, avec des personnes incroyables devenues depuis mes amis les plus proches.

Je tiens donc à leur témoigner tout le bonheur et la fierté que j'ai d'avoir passé ces années avec eux, et à les remercier d'avoir été présents (physiquement pour la plupart, et dans les pensées pour les autres) à ma soutenance. L'émotion a été décuplée en partageant ce moment avec vous, cela restera gravé dans ma mémoire !

Je souhaite aussi remercier Mathilde d'être à mes côtés. Je t'aime.

Enfin, je remercie du fond du cœur et dédie ce manuscrit à ma famille, plus particulièrement à ma grand-mère « Mamama », au « vieux loup » inspirateur de sciences, à mon frère, et à mes parents, les fidèles « sponsors ». Merci pour tout.

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	vii
Nomenclature.....	xi
Introduction générale	1
Chapitre 1. Problématique de l'écoconception de maisons à énergie positive... 11	
Sommaire du chapitre 1	12
1.1. Le bâtiment à énergie positive	13
1.1.1. Introduction	13
1.1.2. Exemples de labels existants	15
1.1.3. Cadres cohérents de définitions d'un BEPOS	22
1.1.4. Exemples de MEPOS existantes.....	39
1.1.5. Conclusion.....	50
1.2. Écoconception de maisons à énergie positive.....	50
1.2.1. Processus de conception d'un bâtiment.....	51
1.2.2. Nouvelles problématiques posées en conception.....	54
1.2.3. Démarche d'écoconception	56
1.2.4. Conclusion.....	64
1.3. Vers une écoconception assistée par optimisation multicritère.....	65
1.3.1. Introduction	65
1.3.2. État de l'art sur l'optimisation	66
1.3.3. Méthodes complémentaires à l'optimisation.....	80
1.4. Démarche proposée	83
1.5. Conclusion du chapitre	86
Chapitre 2. Analyse de sensibilité, analyse d'incertitude, et fiabilité des modèles	87
Sommaire du chapitre 2	88
2.1. Introduction	89
2.2. État de l'art	90
2.2.1. Définitions et concepts de base	90
2.2.2. Analyse d'incertitude	93

Table des matières

2.2.3. Analyse de sensibilité	98
2.2.4. Fiabilité des modèles.....	108
2.2.5. Applications dans le domaine du bâtiment	119
2.2.6. Conclusion sur l'état de l'art	122
2.3. Étude de cas – Méthodologie	123
2.3.1. Démarche et objectifs.....	123
2.3.2. Modèle thermique de bâtiment	124
2.3.3. Cas d'étude.....	125
2.3.4. Analyses de sensibilité et propagation d'incertitudes.....	126
2.4. Étude de cas - Résultats.....	133
2.4.1. Opération de criblage	133
2.4.2. Propagation d'incertitudes	137
2.4.3. Analyse de sensibilité globale.....	141
2.4.4. Conclusion sur l'étude de cas	144
2.5. Conclusion du chapitre	144
Chapitre 3. Algorithme génétique pour l'optimisation multicritère	145
Sommaire du chapitre 3.....	146
3.1. Introduction.....	147
3.2. Algorithmes évolutionnaires	147
3.2.1. Généralités.....	147
3.2.2. Définitions et vocabulaire.....	148
3.2.3. Mécanismes évolutionnaires de base.....	150
3.2.4. Choix d'un algorithme de type NSGA-II.....	162
3.2.5. Applications à la conception de bâtiments.....	169
3.2.6. Conclusion	170
3.3. Paramétrage	170
3.3.1. Problématique du paramétrage des algorithmes évolutionnaires.....	171
3.3.2. Indicateurs de qualité	177
3.3.3. Méthodes de paramétrage existantes	182
3.3.4. Méthodologie retenue.....	188
3.4. Conclusion du chapitre	194
Chapitre 4. Développements informatiques.....	195
Sommaire du chapitre 4.....	196
4.1. Introduction.....	197
4.2. Présentation des composants-logiciels	197
4.2.1. Vocabulaire et éléments préliminaires.....	197
4.2.2. Historique et éléments de contexte.....	199

Table des matières

4.2.3. Composants logiciels de la plateforme	204
4.3. Articulation des composants-logiciels.....	209
4.3.1. Étape n°1 : saisie des données.....	210
4.3.2. Étape n°2 : tirage.....	216
4.3.3. Étape n°3 : calculs.....	217
4.3.4. Étape n°4 : retour des résultats.....	218
4.3.5. Étape n°5 : post-traitement.....	219
4.4. Principaux développements réalisés.....	222
4.4.1. Travaux informatiques concernant R.....	222
4.4.2. Travaux informatiques concernant COMFIE.....	232
4.4.3. Travaux informatiques concernant novaEQUER.....	234
4.4.4. Travaux informatiques concernant le modèle stochastique de comportement des occupants	238
4.4.5. Maintien, capitalisation, et diffusion de la plateforme	239
4.5. Conclusion du chapitre	243
Chapitre 5. Étude de cas : application à la conception d'une maison individuelle	245
Sommaire du chapitre 5	246
5.1. Introduction	247
5.2. Présentation de l'étude de cas	247
5.2.1. Présentation générale	248
5.2.2. Description détaillée	251
5.3. Résultats d'optimisation.....	276
5.3.1. Phase de conception amont.....	277
5.3.2. Phase de conception détaillée	283
5.3.3. Conclusion de la partie	293
5.4. Étude de la robustesse des solutions.....	294
5.4.1. Robustesse au changement de type du ménage.....	294
5.4.2. Robustesse à l'évolution du climat.....	301
5.4.3. Conclusion sur l'étude de la robustesse	316
5.5. Résultats du paramétrage	317
5.5.1. Étude préliminaire	317
5.5.2. Paramétrage par méthode d'échantillonnage	327
5.5.3. Conclusion de la partie	333
5.6. Conclusion du chapitre	334
Conclusion et perspectives.....	337
Références bibliographiques	347

Table des matières

Annexe A - Initiatives nationales ou internationales sur le BEPOS.....	369
Annexe B - Bilan énergétique de la maison INCAS Béton Banché	378
Annexe C – Criblage de Morris.....	381
Annexe D - Indicateurs de mesure de la qualité des solutions	387
Annexe E - Convention de nommage pour la BlackBox COMFIE (version au 18/06/2015)	393
Annexe F - Notice d'utilisation de la neqBlackBox.....	398
Annexe G - Algorithme de Kung et al. (1975)	403
Annexe H - Fonctions de coût	404
Liste des figures.....	405
Liste des tableaux.....	415
Résumé – Abstract.....	417

Nomenclature

LETTRES LATINES

d	Nombre de facteurs d'entrée étudiés	[-]
d	Nombre de gènes (ou de variables de décision)	[-]
D	Plan d'expériences de Box et Behnken à trois niveaux pour trois paramètres	[-]
E_j^i	Effet élémentaire (méthode de Morris)	[-]
E_{LK}	Quantité d'électricité consommée pour le renouvellement d'air, l'appoint de chauffage, et la climatisation	[MJ.m ⁻²]
E_{PV}	Quantité d'électricité photovoltaïque produite	[kWh/m ²]
$E_{pr,el,used}, E_{Pus,i}$	Part d'électricité produite sur site et utilisée pour les usages considérés par l'EPBD au pas de temps i	[J]
$E_{pr,el,used}, nE_{Pus,i}$	Part d'électricité produite sur site et utilisée pour les usages non considérés par l'EPBD au pas de temps i	[J]
$E_{EPus,el,i}$	Électricité consommée pour les usages considérés par l'EPBD au pas de temps i	[J]
$E_{exp,el,used}, nE_{Pus,i}$	Part d'électricité exportée qui est utilisée pour les usages non considérés par l'EPBD au pas de temps i	[J]
$E_{pr,el,used,i}$	Électricité produite sur site et à l'intérieur du domaine choisi au pas de temps i	[J]
$E_{exp,el,tmp}, an$	Part d'électricité exportée sur l'année au réseau, et récupérée par le bâtiment à un pas de temps ultérieur	[J]
$E_{pr,el,i}$	Électricité produite au pas de temps i	[J]
$f_{P,ren}$	Facteur de conversion en énergie primaire renouvelable	[-]
$f_{P,nren}$	Facteur de conversion en énergie primaire non renouvelable	[-]
$\mathcal{F}$	Modèle numérique (ou ensemble de fonctions) étudié	[-]
$g_{h,eff}$	Facteur de conversion en énergie primaire du système de chauffage	[-]

Nomenclature

g_{ww}	Facteur de conversion en énergie primaire du système de production d'eau chaude sanitaire	[-]
g_{LK}	Facteur de conversion en énergie primaire global des systèmes de renouvellement d'air, d'appoint du chauffage, et de climatisation	[-]
g_{PV}	Facteur de conversion en énergie primaire du système de production photovoltaïque	[-]
l	Longueur d'une chaîne de binaires	[-]
n_{50}	Étanchéité à l'air sous une différence de pression de 50 pascals	[vol/h]
$n_{\mathcal{F}}$	Nombre de fonctions objectifs	[-]
n_g	Nombre de gènes (ou de variables de décision)	[-]
N_P	nombre de dimensions (objectifs) d'un ensemble P	
N	Taille de l'échantillon généré	[-]
p	Nombre de segments dans un échantillonnage stratifié	[-]
p_c	Probabilité de croisement	[-]
p_m	Probabilité de mutation	[-]
q	Nombre de sous-échantillons équiprobables d'une partition lors d'une analyse de sensibilité par tests statistiques	[-]
Q	Nombre de niveaux dans la méthode de Morris	[-]
Q^2	Coefficient de prédictivité	[-]
Q_4	Étanchéité à l'air sous une différence de pression de 4 pascals	[m³/h/m²]
$Q_{h,eff}$	Besoins de chauffage	[MJ/m²]
Q_{ww}	Besoins en eau chaude sanitaire	[MJ/m²]
r	Nombre de répétitions dans la méthode de Morris	[-]
R^2	Coefficient de détermination	[-]
T_d	Taux de doublons au sein d'une population	[%]
u, v, w	Matrices des analyses de sensibilité globale	[-]
x	Vecteur de l'ensemble des facteurs d'entrée	[-]
x_0	Vecteur de facteurs d'entrée nominaux	[-]

Nomenclature

x_i	i -ème facteur d'entrée / i -ème composante du vecteur x	[-]
y	Vecteur des sorties	[-]
z	Vecteur des variables d'intérêt	[-]

LETTRES GRECQUES

δ	Intervalle élémentaire de la méthode de Morris	[-]
Δ	Saut dans la méthode de Morris	[-]
$\eta_{h,eff}$	Rendement du système énergétique de chauffage	[-]
η_{ww}	Rendement du système énergétique de production d'eau chaude sanitaire	[-]
λ	Nombre d'individus sélectionnés pour la reproduction	[-]
μ	Espérance d'une loi normale (ou normale tronquée)	[-]
μ	Moyenne des valeurs relatives des effets élémentaires dans un criblage de Morris	[-]
μ	Nombre d'individus dans la population courante	[-]
μ^*	Moyenne des valeurs absolues des effets élémentaires dans un criblage de Morris	[-]
σ	Écart-type d'une loi normale (ou normale tronquée)	[-]
σ	Écart-type des valeurs relatives des effets élémentaires dans un criblage de Morris	[-]

AUTRES NOTATIONS ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFNOR	Association Française de NORmalisation
AE	Algorithme évolutionnaire
AFS	Analyse des Flux d'une Substance
AG	Algorithme génétique
AI	Analyse d'Incertitude

Nomenclature

AIE	Agence Internationale de l'Énergie
ANOVA	« <i>ANalysis Of Variance</i> »
APD	Phase d'études d'Avant-Projet Définitif
APS	Phase d'études d'Avant-Projet Sommaire
AR	Analyse de Risque
AS	Analyse de Sensibilité
ASG	Analyse de Sensibilité Globale
ASL	Analyse de Sensibilité Locale
ASAI	Analyse de Sensibilité et Analyse d'Incertitude
BBC	Bâtiment Basse Consommation
BEPOS	Bâtiment à Énergie POSitive
BESTEST	« <i>Building Energy Simulation TEST</i> »
BGX	Opérateur de croisement génétique reproducteur (« <i>Breeder Genetic Crossover</i> »)
BLX	Opérateur de croisement barycentrique (« <i>Blend Crossover</i> »)
BLX- α	Extension de l'opérateur BLX
CCNUCC	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
COP21	21ème conférence des parties à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CVC	Chauffage, Ventilation et Climatisation
DCE	Phase de composition d'un Dossier de Consultation des Entreprises
DET	Phase de Direction de l'Exécution du ou des contrat(s) de Travaux
DOE	« <i>Department of Energy</i> » (département américain de l'énergie)
DPC	Demande de Permis de Construire
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EIE	Étude d'Impact Environnemental
ENR	Énergies Renouvelables
EPBD	« <i>European Performance Buildings Directive</i> » (directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments)
ESQ	Phase d'études d'ESQuisse
ESQCV	Évaluation Simplifiée et Qualitative du Cycle de Vie

Nomenclature

FAST	« <i>Fourier Amplitude Sensitivity Test</i> »
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat
ICV	Inventaire de Cycle de Vie
MEPOS	Maison à Énergie POSitive
MI	Maison Individuelle
NREL	« <i>National Renewable Energy Laboratory</i> »
NSGA-II	« <i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i> »
nZEB	Nearly Zero-Energy Building
NZEB	Net Zero-Energy Building
OAT	« <i>One-At-a-Time</i> »
OPC	Phase d'Ordonnancement, du Pilotage et de la Coordination du chantier
PCC	« <i>Partial Correlation Coefficient</i> »
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PNAEE	Plan National d'Action en matière d'Efficacité Énergétique
PHI	<i>Passive House Institut</i>
PIB	Produit Intérieur Brut
PRCC	« <i>Partial Rank Correlation Coefficient</i> »
PRO	Phase d'études de PROjet
PV	Photovoltaïque
RBD	« <i>Random Balance Design</i> »
RER	« <i>Renewable Energy Ratio</i> » (part des énergies renouvelables)
RPC	Rétribution à Prix Coûtant du courant injecté
RT	Réglementation Thermique
SBX	Opérateur de croisement binaire simulé « <i>Simulated Binary Crossover</i> »
SBX-I	Extension de l'opérateur SBX avec une loi log-normale
SRC	« <i>Standardised Regression Coefficient</i> »
SRRC	« <i>Standardised Rank Regression Coefficient</i> »
STD	Simulation Thermique Dynamique

Introduction générale

❖ Le constat d'une pression anthropique non soutenable

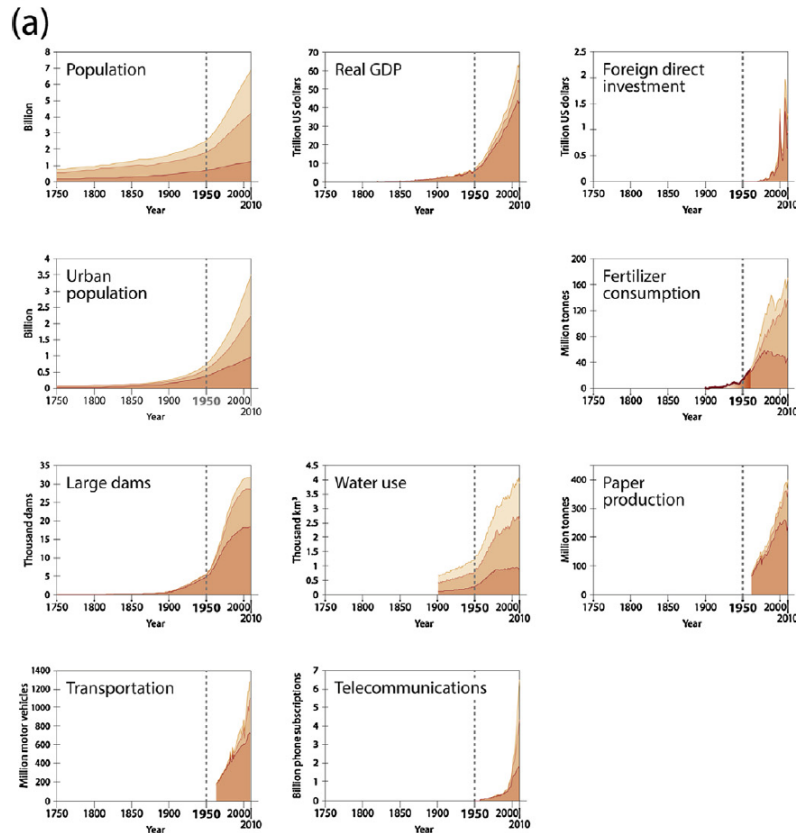
L'humanité exerce une pression sans précédent sur la planète, et est désormais capable d'en bouleverser le fonctionnement au point de mettre fin à une période de certaine stabilité du climat depuis plus de dix millénaires (Holocène). Pour certains spécialistes, ce dérèglement est marqué par une nouvelle ère géologique, l'Anthropocène (Crutzen 2002), où les activités humaines prédominent sur les mécanismes régissant l'état de relatif équilibre du système terrestre (Steffen et al. 2007). Si cette ère débute lors de la révolution industrielle du XIX^{ème} siècle, le processus se précipite à la fin de la seconde guerre mondiale, c'est la « grande accélération ». Illustrée à la Figure 0-1, cette pression anthropique se caractérise par une corrélation directe entre les grandes tendances socio-économiques mondiales (population, croissance économique, urbanisation, transports, télécommunications, usage de l'eau...) et celles décrivant l'évolution de l'état de la planète (émissions de gaz à effet de serre, hausse des températures, acidification des océans, perte de la biodiversité, artificialisation des sols...). L'usage de fertilisants, n'ayant démarré qu'au début du XIX^{ème} siècle, et s'étant considérablement accéléré à partir du milieu du XX^{ème} siècle en passant de quelques tonnes en 1950 à près de 170 tonnes aujourd'hui, est l'un des marqueurs parmi d'autres de ce phénomène dépeint Figure 0-1.

Comment s'en étonner d'ailleurs ? Le développement de nos sociétés occidentales repose en majorité sur une demande expansive en énergies fossiles et en matières premières non renouvelables (à l'échelle de temps humaine). Or la croissance matérielle perpétuelle se heurte à une double limite physique. D'une part, les stocks en ressources naturelles non renouvelables sont finis, et leur taille n'est pas immense au regard des prélèvements annuels de l'humanité. D'autre part, les activités anthropiques associées à la transformation de ces ressources s'accompagnent d'une pollution (par l'émission de multiples substances chimiques dans l'environnement) engendrant des dommages en matière de santé et de biodiversité. D'après le célèbre « rapport Meadows » (Meadows et al. 1972)¹, une baisse brutale de la population associée à une détérioration manifeste des conditions de vie (produit industriel par habitant, quota alimentaire par habitant...) pourrait en résulter avant la fin du siècle.

¹ Cette étude, menée par une équipe de chercheurs du Massachusetts Institute of Technology à l'initiative du Club de Rome, a été réactualisée 30 ans après, confirmant les résultats obtenus (Meadows et al. 2004).

Socio-economic trends

OECD BRICS Others



Earth system trends

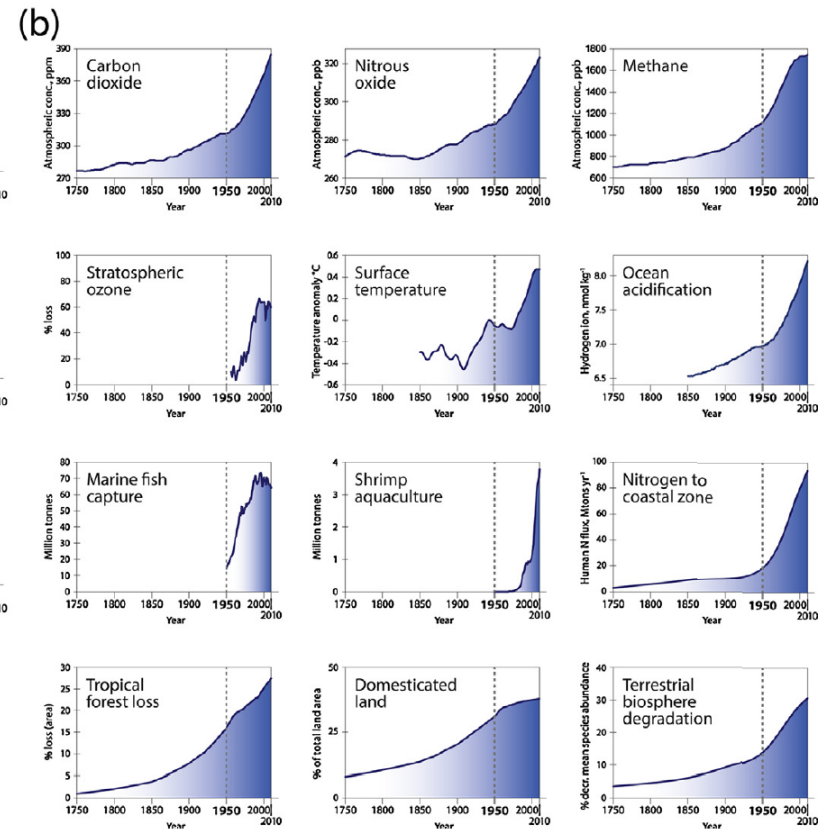


Figure 0-1. Liens entre activités humaines et états du système Terre, tirée de Bai et al. (2015)

❖ L'impératif d'agir

Face à ce constat, dont nous prenons conscience chaque jour un peu plus, l'impératif d'agir s'impose. Nos modes de prise de décision sont à fondamentalement repenser afin de s'orienter vers un développement plus durable² de notre société. La construction d'un nouveau modèle de gouvernance mondiale, capable de gérer la globalité de la problématique, est ainsi attendue. Dans ce sens, l'accord de Paris sur le climat, obtenu lors de la 21^{ème} conférence (COP21) des parties à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en décembre 2015, constitue une étape supplémentaire à celles déjà réalisées depuis le sommet de la Terre de Rio en 1992. Lutter contre le risque croissant d'un emballement climatique à l'échelle planétaire est en effet l'une des actions prioritaires à mener. L'accroissement des températures constaté depuis 1950, et attribué aux activités humaines de manière « extrêmement probable » par le GIEC³ (IPCC 2014), a pour conséquence, des événements climatiques extrêmes plus nombreux, des problèmes sanitaires en hausse, une insécurité alimentaire exacerbée, davantage de conflits et de rivalités, et un coût économique de l'inaction élevé, déjà mis en avant par Stern (2006), et affecte ainsi les composantes essentielles de la vie (accès à l'eau, production alimentaire, santé, etc.).

L'énergie tient une place centrale dans la problématique exposée ci-dessus. En physique, l'énergie est une grandeur caractérisant le changement d'état d'un système. Elle intervient par exemple lors d'une extraction (énergie mécanique), d'une transformation (énergie chimique), d'un déplacement (énergie cinétique) ou encore d'un changement de température (énergie thermique). La quantité d'énergie mobilisée par une personne est ainsi la traduction de son aptitude à modifier son environnement, et potentiellement à l'impacter (Jancovici 2015). Or, à l'échelle mondiale, la consommation d'énergie a été multipliée par un facteur 10 à 25 (selon les estimations concernant l'usage du bois-énergie dans les années 1900) durant le siècle dernier (Figure 0-2), traduisant une exacerbation de la pression de l'Homme sur la planète. Elle résulte du produit de deux changements d'ordre de grandeur. Le premier concerne la consommation d'énergie par terrien, multipliée par un facteur 10 en moyenne mondiale depuis le milieu du XIX^{ème} siècle environ. Au fil de la révolution industrielle, le labeur humain a en effet été massivement remplacé par l'utilisation de machines, plus productives car basées sur des combustibles fossiles peu chers et apparemment abondants (p. ex. le charbon avec la machine à vapeur ou le pétrole avec le moteur à

² Au sens de la définition du rapport Brundtland, c'est-à-dire un développement « qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (World Commission on Environment and Development 1987).

³ GIEC : Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat

essence). Actuellement, chaque terrien mobilise⁴ ainsi 200 fois l'équivalent en travail mécanique de ce qu'une « machine » humaine pourrait fournir (Jancovici 2013). Le second changement d'ordre de grandeur est l'explosion démographique. L'ancien vice-président des États-Unis d'Amérique, Al Gore, la met en relief en soulignant « qu'il aura fallu 10 000 générations pour atteindre 2 milliards d'êtres humains, et le temps d'une vie, la sienne, la population mondiale devrait passer de 2 à 9 »⁵. Selon de récentes estimations des Nations Unies (United Nations, 2015), ce nombre pourrait même dépasser 11 milliards d'ici la fin du siècle.

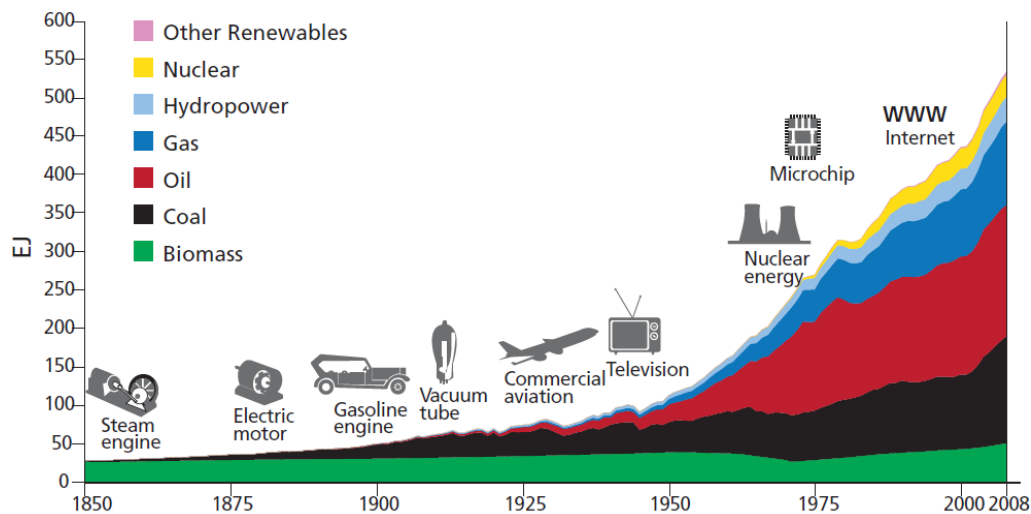


Figure 0-2. Consommation mondiale d'énergie primaire, tirée de GEA (2012) d'après Nakićenović et al. (1998) et Grubler (2008)

Aujourd'hui, et depuis plusieurs décennies, l'énergie consommée dans le monde est à 80 % issue de l'exploitation de sources énergétiques carbonées (Figure 0-2) telles que le pétrole, le charbon, et le gaz, participant de façon majeure aux émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'enjeu concernant l'énergie pour le XXI^{ème} siècle est ainsi double : réduire conjointement la consommation d'énergie mondiale et la part des combustibles fossiles dans le mix énergétique. Dans ce but, l'Union Européenne (UE) s'est engagée via un plan d'action à réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES) et à renforcer sa sécurité énergétique en diminuant sa dépendance à l'égard du pétrole et du gaz. Via les paquets Énergie-Climat 2020⁶ et 2030⁷, elle vise à :

⁴ On notera que le terme mobilisation devrait être préféré à celui, impropre, de consommation. Un terrien ne consomme pas lui-même de l'énergie, mais plutôt la mobilise (ou la rend disponible) pour des machines qui elles la consomment.

⁵ <http://stfiacre2010.free.fr/Contenu/Comprendre/Energie/video1.html>

⁶ http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_fr.htm

- réduire les émissions de GES de 20 % pour 2020 (et d'au moins 40 % pour 2030) ;
- porter la part des énergies renouvelables à 20 % pour 2020 (et au moins 27 % pour 2030) ;
- améliorer l'efficacité énergétique de 20 % pour 2020 (et d'au moins 27 % pour 2030).

Par la loi POPE de 2005⁸, fixant les orientations de la politique énergétique nationale, la France s'est de plus donné l'objectif propre de diviser par quatre ses émissions de GES entre 1990 et 2050, engagement plus connu sous le nom de « facteur 4 ». Plus globalement, le Grenelle Environnement, à travers les lois dites Grenelle I (2009) et Grenelle II (2010)⁹, fixe des orientations à long terme en matière d'environnement et de développement durable en intégrant par exemple des aspects comme la biodiversité, les déchets, ou l'eau. Ces lois ouvrent des chantiers sectoriels prioritaires dont le résidentiel-tertiaire fait parti.

❖ Le rôle du secteur du bâtiment

Sur le plan national comme au niveau mondial, le secteur du bâtiment représente en effet des enjeux considérables sur les trois piliers du développement durable (environnement, social, économie).

Responsable de près de 40 % de la consommation d'énergie finale à l'échelle planétaire, le bâtiment est le secteur le plus énergivore en France, avec 45 % de l'énergie finale, devant les transports et l'industrie¹⁰. Ce secteur est aussi responsable de près d'un quart des émissions de GES (ADEME 2013). Il produit davantage de déchets que les ordures ménagères : en 2004, 40 millions de tonnes par an de déchets inertes étaient en provenance du bâtiment contre 28 millions de tonnes venaient des ordures ménagères dont 6 millions de tonnes d'encombrants (Peuportier 2008), et est l'un des principaux consommateurs d'eau, derrière l'agriculture. En consommant les deux tiers de l'énergie électrique finale¹⁰, le bâtiment participe aussi de manière significative à la production de déchets nucléaires, puisque que près de 80 % de l'électricité française provient de la fission nucléaire.

Sur le plan social, 2,72 millions de ménages consacrent plus de 10 % de leurs revenus aux dépenses énergétiques, et d'après l'indicateur BRDE (Bas Revenus,

⁷ http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/index_fr.htm

⁸ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000813253>

⁹ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022470434>

¹⁰ http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2016/reperes-chiffres-cles-energie-2015.pdf

Dépenses Élevées), 3,42 millions de ménages ont des revenus inférieurs au seuil de pauvreté et des dépenses énergétiques supérieures à la médiane nationale. L'observatoire national de la précarité énergétique (ONPE) estime à 1,29 millions le nombre de ménages se privant au moins partiellement de chauffage, et exprimant *de facto* une sensation de froid. Au total, de l'ordre de 5 millions de ménages peuvent être considérés en situation de précarité énergétique¹³.

À 40,1 milliards d'euros en 2015, la facture énergétique française enregistre son plus faible niveau¹¹ depuis 2009 (record en 2012 à 68,7 milliards d'euros) mais représente toujours plus de 50 % du déficit de la balance commerciale. De plus, comme en 2014, l'amélioration observée résulte essentiellement de la baisse du prix du pétrole et des températures hivernales exceptionnellement douces. Premier secteur en matière de consommation d'énergie finale, le bâtiment est l'un des principaux contributeurs à cette facture. Il est aussi un fort générateur d'emplois avec près de 1,5 millions de personnes en France¹², et le marché de l'efficacité énergétique dans ce secteur est estimé à 16 milliards d'euros par an par l'ADEME¹³.

❖ Les objectifs du secteur

De par son ampleur, le secteur du bâtiment est l'un des leviers prioritaires d'action dans les politiques françaises en matière de développement durable.

Pour le parc de bâtiments existants, le Plan Bâtiment du Grenelle Environnement prévoit de réduire les consommations d'énergie d'au moins 38 % d'ici à 2020 et, à cette fin, de conduire un programme ambitieux de rénovation thermique et énergétique des bâtiments pour atteindre le rythme de 400 000 rénovations complètes de logements chaque année à compter de 2013, et de 500 000 d'ici 2017 (120 000 logements sociaux et 380 000 logements privés). Avec en 2013 un rythme des rénovations compris entre 180 000 et 350 000 selon les estimations, les cibles 2017 apparaissent pour l'heure très ambitieuses¹⁴.

En construction neuve, la réglementation thermique (RT) 2012 a d'abord généralisé le label « bâtiment basse consommation » (BBC¹⁵). Avec l'article 4-b de la loi dite Grenelle 1 (loi du 3 août 2009¹⁶), la France prévoit à présent que « toutes les constructions neuves [...] à compter de la fin 2020 présentent, sauf

¹¹ Pour mémoire, cette facture n'existait pas avant la fin des Trente Glorieuses et est restée de l'ordre de 10 milliards d'euros en moyenne jusqu'en 2000.

¹² http://www.ffbatiment.fr/Files/pub/Fede_N00/NAT_LES_CHIFFRES_EN_FRANCE_3345/95a39ea5ef4e4b61b9c7b2a4ae9d7bef/EDIT/Batiment-chiffres2015.PDF

¹³ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Sortie-du-rapport-Panorama.html>

¹⁴ http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/CSTB_TABLEAU_DE_BORD_2014.pdf

¹⁵ <http://www.effinergie.org/web/index.php/les-labels-effinergie/bbc-effinergie>

¹⁶ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000020949548>

exception, une consommation d'énergie primaire¹⁷ inférieure à la quantité d'énergie renouvelable produite dans ces constructions ». C'est le « bâtiment à énergie positive » inscrit dans le plan d'action de la France en matière d'efficacité énergétique (PNAEE) remis à la commission européenne en avril 2014, et mentionné à l'article 4 du titre II de loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte¹⁸. Outre la performance énergétique, l'article L111-9¹⁹ du code de la construction retient également la performance environnementale des nouvelles constructions, « [...] notamment au regard des émissions de gaz à effet de serre, de la consommation d'eau ainsi que de la production de déchets liés à leur édification, leur entretien, leur réhabilitation et leur démolition ». L'article enjoint ainsi à une évaluation élargie de la performance globale des bâtiments neufs, d'une part en prenant en compte des impacts environnementaux complémentaires (émissions de GES, consommation d'eau, et production de déchets inertes) à celui de la consommation énergétique, d'autre part en considérant l'ensemble du cycle de vie (construction, exploitation, maintenance/rénovation, démolition) et non plus la seule étape d'utilisation du bâtiment.

❖ Part de la maison individuelle dans le résidentiel-tertiaire

La maison individuelle (MI) représente à ce jour près de 60 % des constructions neuves annuelles de logement, et environ 70 % des consommations énergétiques du secteur résidentiel. Sur les 33,4 millions de logements que comptait le parc résidentiel en 2012, plus de 56 % correspondent à des MI (ADEME 2013), soit pratiquement 19 millions. Depuis 1976, ce secteur représente entre 50 et 55 % des mises en chantier annuelles de logements et plus de la moitié des surfaces construites, soit environ 200 000 nouvelles unités par an. Les estimations prospectives tablent sur un marché relativement stable pour les prochaines années, entre 150 000 et 200 000 unités par an.

Ainsi, si l'impératif de développement durable passe à court terme prioritairement par la réhabilitation du parc existant, le secteur de la MI neuve constitue néanmoins un enjeu important d'un point de vue énergétique et économique entre autres, notamment en s'inscrivant dans le long terme. De plus, la construction neuve de MI constitue un intéressant « laboratoire d'innovation » pour de nouveaux matériaux, procédés constructifs, stratégies de gestion, etc. dont la rénovation et le reste de la filière pourront par la suite bénéficier.

¹⁷ L'énergie primaire est l'énergie prélevée à l'environnement, sans transformation. En retirant les pertes d'énergie liées à la transformation, le stockage, et le transport de cette énergie primaire, est obtenue l'énergie finale, qui est l'énergie disponible pour l'utilisateur final.

¹⁸ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031044385&categorieLien=id>

¹⁹ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000022493184&cidTexte=LEGITEXT000006074096>

❖ Périmètre et objectifs des travaux de thèse

Dans ce contexte, le développement de maisons à énergie positive délimite le périmètre de ces travaux de thèse. Si dans les textes, le déploiement à grande échelle de cette nouvelle génération de bâtiment semble acté dans un futur proche, leur conception constitue néanmoins une problématique complexe d'aide à la décision pour les professionnels de la construction. Pour s'inscrire comme des solutions de développement durable, ces bâtiments devront en effet dépasser le cadre énergétique actuel, et être écoconçus pour intégrer les impacts environnementaux qui leur sont associés. Dans le même temps, il conviendra également de satisfaire une pertinence économique et le confort des occupants. La prise en compte de ces aspects sur tout le cycle de vie impose enfin un retour au temps long dans l'analyse de la performance de ces bâtiments, nécessitant d'appréhender le risque de non-robustesse d'une décision face aux aléas d'un futur, par nature, incertain.

Cette thèse de doctorat se donne ainsi pour objectif de contribuer au développement de méthodologies et outils robustes, permettant d'identifier, sous une approche multicritère et sur leur cycle de vie, des concepts de maisons :

- à « énergie positive » ;
- à impacts environnementaux réduits ;
- à coût acceptable pour le marché ;
- et avec un niveau de confort satisfaisant.

❖ Plan du manuscrit

Dans le but de produire des connaissances vis-à-vis de cet objectif, ces travaux de thèse ont étudié une démarche basée sur l'optimisation multicritère et constituant une aide à la décision pour l'écoconception de maisons à énergie positive. Le manuscrit s'articule autour de cinq chapitres.

Le **premier chapitre** vise à poser la problématique de l'écoconception de maisons à énergie positive. Un état de l'art sur le « bâtiment à énergie positive » est tout d'abord réalisé, permettant de clarifier sa définition et d'esquisser ses principales caractéristiques. Les enjeux de l'écoconception appliquée aux maisons à énergie positive sont ensuite précisés, ce qui permet finalement de justifier l'optimisation multicritère comme réponse adaptée à ces enjeux, et de conclure sur la démarche globale proposée et les verrous à lever dans ces travaux de thèse. En effet, si l'augmentation de la puissance des ordinateurs a rendu accessible l'utilisation de techniques d'optimisation, leur application à des modèles complexes tels que ceux simulant les performances énergétiques et environnementales d'un bâtiment, soulève un certain nombre de difficultés, dont notamment la durée des calculs, l'interprétation multicritère de la performance, et l'évaluation du degré de robustesse des solutions obtenues.

Dans cette optique, le **deuxième chapitre** se consacre aux méthodes d'analyses de sensibilité et d'incertitude. Les premières permettent l'identification des paramètres de conception les plus influents afin de concentrer les efforts de recherche, tandis que les secondes offrent la possibilité de contribuer à l'étude de la robustesse des solutions d'optimisation. L'intérêt de ces méthodes est illustré à travers la mise en œuvre d'une démarche de validation expérimentale d'un modèle de simulation thermique dynamique, permettant de justifier son utilisation dans le cadre des bâtiments à haute performance énergétique.

Le **troisième chapitre** présente l'approche d'optimisation retenue. Sur la base d'une synthèse des principes généraux, un algorithme génétique a été adapté afin de répondre à la problématique de l'écoconception de maisons à énergie positive. Le réglage de ses paramètres internes pouvant conditionner sa performance, la méthodologie d'un travail exploratoire sur ce sujet généralement peu abordé dans le domaine du bâtiment est décrite.

Le **quatrième chapitre** donne une vue d'ensemble sur les développements informatiques effectués pour permettre la mise en œuvre opérationnelle de la démarche proposée dans ces travaux de thèse.

Enfin, le **cinquième** et dernier **chapitre** illustre la démarche via son application à une étude de cas. Grâce à une collaboration avec un constructeur de maisons individuelles, nous avons participé en temps réel à un processus de conception intégré pour confronter à la réalité la démarche et les moyens informatiques développés dans les chapitres précédents. Deux aspects ont notamment été étudiés : le degré de faisabilité opérationnelle de la démarche, et son niveau de robustesse.

Les apports mais aussi les limitations actuelles de l'approche, dégagés lors de cette étude de cas, permettent, au terme de ce manuscrit, de proposer une conclusion sur les travaux entrepris, et d'esquisser quelques perspectives.

Chapitre 1. Problématique de l'écoconception de maisons à énergie positive

Ce chapitre a pour objectif de poser le cadre de ces travaux de doctorat. Dans cette optique, un état de l'art sur le bâtiment à énergie positive est tout d'abord effectué afin d'en clarifier le concept, notamment par l'examen des principales approches internationales existantes (partie 1.1). Les enjeux liés à l'écoconception de maisons à énergie positive sont ensuite détaillés, mettant en évidence les limites du processus actuel de conception, et invitant à changer de paradigme (partie 1.2). Une aide à la décision assistée par optimisation multicritère est ainsi explorée (partie 1.3), permettant de finalement proposer une démarche adaptée à la problématique posée (partie 1.4).

SOMMAIRE DU CHAPITRE 1

1.1. Le bâtiment à énergie positive	13
1.1.1. Introduction	13
1.1.2. Exemples de labels existants	15
1.1.3. Cadres cohérents de définitions d'un BEPOS.....	22
1.1.4. Exemples de MEPOS existantes	39
1.1.5. Conclusion	50
1.2. Écoconception de maisons à énergie positive	50
1.2.1. Processus de conception d'un bâtiment	51
1.2.2. Nouvelles problématiques posées en conception	54
1.2.3. Démarche d'écoconception.....	56
1.2.4. Conclusion	64
1.3. Vers une écoconception assistée par optimisation multicritère	65
1.3.1. Introduction	65
1.3.2. État de l'art sur l'optimisation.....	66
1.3.3. Méthodes complémentaires à l'optimisation	80
1.4. Démarche proposée	83
1.5. Conclusion du chapitre	86

L'introduction générale a présenté le point de départ de cette thèse de doctorat : une pression anthropique non soutenable qui nous enjoint d'agir, en particulier dans le secteur clé du bâtiment où le concept de maison à énergie positive est considéré comme l'une des solutions possibles à l'atténuation des effets du changement climatique. Cette action doit s'appuyer sur une meilleure compréhension du système complexe que constitue ce type de bâtiment, ce qui nécessite une production de connaissances et justifie les développements proposés.

1.1. LE BÂTIMENT À ÉNERGIE POSITIVE

Le « bâtiment à énergie positive » (BEPOS) est considéré comme l'une des solutions possibles pour l'atténuation des effets du changement climatique. Cette partie dresse dans ce but un état de l'art du concept. Après une introduction (section 1.1.1), l'examen de quelques labels existants est réalisé (section 1.1.2) à partir duquel trois cadres cohérents de définitions du BEPOS sont ensuite décrits (section 1.1.3). Enfin, plusieurs réalisations exemplaires sont étudiées pour le retour d'expérience qu'elles apportent (section 1.1.4). De plus, l'Annexe A présente une revue d'initiatives nationales ou internationales portant sur le développement du BEPOS, notamment celle de l'AIE et du projet français COMEPOS.

1.1.1. Introduction

« À énergie positive » réfère communément à un bâtiment produisant davantage d'énergie qu'il n'en consomme annuellement, mais peut aussi être interprété comme simplement un bâtiment producteur d'énergie, se démarquant en ce sens des concepts énergétiques classiques (Thiers 2008) tels que le « bâtiment à (très) basse consommation »²⁰ (« *low energy building* ») ou le « bâtiment passif »²¹ (« *Passivhaus* » en allemand ou « *Passive House* » en anglais) dont la production d'énergie n'est pas explicitée. L'appellation française « bâtiment à énergie positive » (BEPOS) n'est pas encore pour l'heure associée à une définition réglementaire, et par conséquent à une méthode de calcul. Ayant vocation à devenir la traduction nationale de la directive européenne 2010/31/EU sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD 2010), elle s'inscrit dans l'objectif annoncé des États membres de veiller à ce que tous les

²⁰ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000615939>

²¹ http://www.passivehouse.com/03_certification/02_certification_buildings/08_energy_standards/08_energy_standards.html

nouveaux bâtiments soient « presque à zéro énergie d'ici 2020 » (« *nearly zero energy* »), c'est-à-dire « ayant des performances énergétiques très élevées où 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 sur site ou à proximité » (article 2 de la directive). L'article 4-b de la loi Grenelle 1 indique ainsi que le bilan énergétique est à effectuer en énergie primaire²² (ce qui est mentionné dans l'annexe I de la directive) et que la production d'énergie doit être renouvelable.

Autour de cette définition qualitative, de nombreuses déclinaisons du concept du BEPOS coexistent. Dans un rapport commandé par la commission européenne (Ecofys et al. 2013), près de 75 définitions, certifications, méthodologies de calcul, ou labels relatifs aux « *nearly zero-energy buildings* » (nZEB) ont été recensés dans 17 pays. Les spécificités de chaque pays en matière de climat, de mix énergétique, de traditions constructives, mais aussi d'orientations politiques expliquent cette diversité, et l'impossibilité d'extraire une définition unique du concept de « bâtiment à énergie positive ». Un cadre européen cohérent permettant d'appréhender et d'établir de manière systématique ces diverses définitions semble davantage pertinent. Les questions majeures posées sont :

- Qu'est-ce qu'un bâtiment quasiment à zéro énergie (nZEB) ?
- Quelle devra être la part des énergies renouvelables ?
- Quelles sont les options techniques et technologiques pour construire des nZEB ?
- Est-ce que les nZEB doivent être définis en vue de parvenir à des niveaux optimaux en fonction des coûts ?

Pour répondre à ces questions, l'analyse de bâtiments performants et innovants issus notamment de projets pilotes, par le retour d'expérience qu'ils apportent, peut permettre d'identifier les solutions adaptées et les seuils adéquats pour le nZEB.

²² L'énergie primaire est l'énergie prélevée à l'environnement, sans transformation. En retirant les pertes d'énergie liées à la transformation, le stockage, et le transport de cette énergie primaire, est obtenue l'énergie finale, qui est l'énergie disponible pour l'utilisateur final.

1.1.2. Exemples de labels existants

1.1.2.1. LE LABEL BEPOS-EFFINERGIE

Le label français BEPOS-Effinergie²³ est un label pilote, applicable à court terme, et s'appuyant sur la réglementation thermique en vigueur pour la construction neuve (RT 2012²⁴) et le label *Effinergie* +²⁵, autre label de performance énergétique proposé par l'association *Effinergie*. À l'instar du label BBC-Effinergie qui avait préfiguré la RT 2012, ce label devrait alimenter les contours de la future réglementation thermique 2020 sur le BEPOS. L'objectif affiché est de mettre en avant les bâtiments consommant peu d'énergie non renouvelable et produisant localement une quantité significative d'énergie renouvelable (ENR). Cette exigence est formulée par un bilan en énergie primaire non renouvelable – somme des énergies finales importées pondérées par leurs facteurs de conversion en énergie primaire (Tableau 1-1), diminuée de la production locale d'énergie exportée - devant être inférieur à un écart autorisé à l'énergie positive, de manière à intégrer les inégalités météorologiques (climat plus rigoureux dans certaines régions que d'autres) et urbaines (une forte densité urbaine implique des surfaces au sol ou en toiture plus réduites pour l'installation de systèmes de production d'énergie).

En plus de cette exigence, le label consiste à ajouter l'obligation du calcul de la consommation d'énergie grise (*i.e.* l'énergie liée à la fabrication, le transport et la mise en œuvre des matériaux de construction et des équipements du bâtiment) et de l'énergie liée aux déplacements des occupants²⁶ aux impératifs du label *Effinergie*+, où ces indicateurs sont uniquement recommandés. Ce dernier label reprend et renforce les exigences de la RT 2012 selon trois progrès :

- Progrès n° 1 : Amélioration de l'enveloppe du bâtiment et sa performance énergétique via une réduction des indicateurs réglementaires Bbio (Besoins Bioclimatiques) et Cep (Consommation Énergie Primaire) selon le type de bâtiment, et pour les cinq usages réglementaires (le chauffage, le refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage et les auxiliaires), amélioration de l'étanchéité à l'air, et amélioration de l'efficacité des systèmes de ventilation et de la qualité de l'air en rendant obligatoire la mesure de la perméabilité à l'air des réseaux.

²³ <http://www.effinergie.org/web/index.php/les-labels-effinergie/bepos-effinergie>

²⁴ <http://www.rt-batiment.fr/batiments-neufs/reglementation-thermique-2012/presentation.html>

²⁵ <http://www.effinergie.org/web/index.php/les-labels-effinergie/le-label-effinergie-plus>

²⁶ <http://www.effinergie-ecomobilite.fr/>

- Progrès n° 2 : Obligation d'évaluer les consommations dites « mobilières » (qui sont donc intégrées au bilan précédent), c'est-à-dire l'électroménager en général (froid, audio-visuel, informatique, lave-vaisselle, etc.), obligation de suivre les consommations d'énergie (pour les bâtiments à usage d'habitation) et de délivrer l'information aux occupants.
- Progrès n° 3 : Obligation d'afficher la production totale d'énergie renouvelable dont la part de production locale d'électricité d'origine renouvelable, le Cep par usage et par énergie, le Bbio, les consommations mobilières annuelles, le taux de couverture (*i.e.* la part de la consommation couverte par la production locale d'ENR), et les émissions de GES en kg de CO₂ équivalent.

Tableau 1-1. Facteurs de conversion d'énergie finale en énergie primaire, d'après (Association Effinergie 2015)

Énergie	Coefficient énergie entrante	Coefficient énergie sortante
Électricité	2,58	2,58
Bois	0	-
Réseau de chaleur (si la chaleur est produite au moins à 50 % à partir de biomasse, géothermie, incinération de déchets, ou énergies de récupération)	0,5 ou % de non-ENR si celle-ci est certifiée	-
Autres réseaux de chaleur	1	-
Gaz, fioul, autre	1	-

1.1.2.2. LE LABEL *MINERGIE* – A

La marque *MINERGIE* propose trois standards de construction destinés aux bâtiments neufs ou rénovés (Figure 1-1). Le standard *MINERGIE* peut être assimilé au BBC français, le standard *MINERGIE-P* au passif allemand, et le standard *MINERGIE-A* à une déclinaison du nZEB énoncé dans la directive 2010/31 de l'Union Européenne (UE) présentée précédemment.

Comparaison des standards Minergie: Concept pour les nouvelles constructions			
	MINERGIE® Bâtiments à faible consommation d'énergie	MINERGIE-P® Bâtiments à énergie minimale	MINERGIE-A® Bâtiments à énergie positive
Indice Minergie thermique	38 kWh/m²a (3,8 litres de mazout)	30 kWh/m²a (3 litres de mazout)	0 kWh/m²a
Exigence primaire (besoins de chaleur pour le chauffage)	90% des exigences légales	60% des exigences légales	90% des exigences légales
Etanchéité de l'enveloppe	Pas d'exigence	Echange d'air inférieur à 0,6/h pour une différence de pression de 50 P	
Amenée d'air extérieur	Un renouvellement systématique de l'air augmente le confort d'habitation et diminue les besoins en énergie		
Energie d'appoint chaleur	Pas prise en compte	Prise en compte	
Electricité du ménage	Pas d'exigence	Meilleurs appareils. Pour les bureaux: Eclairage conforme à la norme SIA	Meilleurs appareils et éclairage
Energie grise	Pas d'exigence	Pas d'exigence	Inférieure à 50 kWh/m²a
Possibilités de combinaison	Avec ECO		
	–	Avec Minergie-A	Avec Minergie-P
Coûts supplémentaires	Maximum 10%	Maximum 15%	Pas d'exigences
Remarques	Minergie est le standard de base. Les exigences pour l'enveloppe correspondent à celles des cantons aux prescriptions les plus sévères.	Minergie-P constitue un mode de construction à énergie minimale, l'enveloppe du bâtiment doit impérativement être de très bonne qualité.	Energie Zéro ou Plus définie avec précision. Le recours à l'énergie solaire est indispensable pour atteindre le standard.

Figure 1-1. Exigences des standards MINERGIE pour les nouvelles constructions, tirée de MINERGIE (2016)

L'exigence principale du standard MINERGIE concerne l'indice « MINERGIE thermique » devant être inférieur ou égale à zéro. Cet indice, en kWh/m², est calculé selon l'équation (1.1) (MINERGIE 2013) :

$$\frac{Q_{h,eff}}{3,6} \times \frac{g_{h,eff}}{\eta_{h,eff}} + \frac{Q_{ww}}{3,6} \times \frac{g_{ww}}{\eta_{ww}} + \frac{E_{LK}}{3,6} \times g_{LK} - E_{PV} \times g_{PV} \quad (1.1)$$

avec :

- $Q_{h,eff}$: les besoins de chauffage (en MJ/m²) ;
- Q_{ww} : les besoins en ECS (en MJ/m²) ;
- E_{LK} : la quantité d'électricité consommée pour le renouvellement d'air, l'appoint en exploitation (i.e. les auxiliaires), et la climatisation (en MJ/m²) ;
- E_{PV} : la production spécifique des installations photovoltaïques (en kWh/m²) ;
- $\eta_{h,eff}$ et η_{ww} : les fractions utiles de chaque vecteur énergétique correspondant, c'est-à-dire les rendements des systèmes énergétiques répondant respectivement aux besoins de chauffage et d'ECS ;

- $g_{h,eff}$, g_{ww} , g_{LK} , et g_{PV} : les facteurs de pondération de chaque vecteur énergétique correspondant, i.e. les facteurs de conversion d'énergie finale en énergie primaire des sources énergétiques associées respectivement aux besoins de chauffage, aux besoins d'ECS, à la quantité d'électricité E_{LK} et à la production photovoltaïque E_{PV} .

À noter que la production photovoltaïque n'est admissible que si l'installation est fixée au bâtiment et/ou aux constructions annexes, et que la plus-value écologique de l'électricité produite profite réellement au bâtiment i.e. pas de Rétribution à Prix Coûtant du courant injecté (RPC), ni de vente à des bourses de courant. Sous certaines conditions, une installation solaire thermique combinée à un système de chauffage utilisant de la biomasse avec stockage permet d'élever la valeur limite de l'indice de 0 à 15 kWh/m²/an.

La seconde exigence concerne l'enveloppe du bâtiment qui doit répondre à un besoin de chauffage réduit à 90 % ou moins du seuil légal suisse défini dans la norme SIA 380/1. Par rapport au standard *MINERGIE-P* exigeant une réduction à 60 %, la contrainte a été relâchée. L'expérience a en effet montré que cette exigence représentait un véritable défi pour les architectes et constructeurs de maisons. Cette réévaluation à la baisse de la performance de l'enveloppe est également le fruit d'une volonté d'accorder une plus grande liberté en conception, notamment pour moins se focaliser sur la réduction des besoins de chauffage et davantage viser un équilibre optimal entre consommation et production d'énergies.

Une troisième exigence porte sur l'énergie grise (en énergie primaire non renouvelable), avec une valeur seuil peu contraignante de 50 kWh/m²/an. La méthode de calcul (cahier technique SIA 2032), relativement nouvelle présente un niveau d'incertitudes élevé poussant actuellement à la prudence. Au fil de l'avancée des connaissances, cette exigence pourra être renforcée.

Concernant les autres exigences du standard, une étanchéité à l'air très performante est requise avec 0,6 vol/h pour une différence de 50 pascals (n_{50}). Cette exigence est identique à celle du label allemand « *Passive House* » (§ 1.1.2.3 suivant). À titre de comparaison, le label BEPOS *Effinergie* exige une étanchéité à l'air sous 4 pascals (Q_4)²⁷ de 0,4 m³/h/m² (contre 0,6 pour la RT 2012), correspondant, dans le cas d'une maison individuelle avec un volume chauffé de 300 m³ et une surface de parois déperditives de 220 m², à environ 1,6 vol/h exprimé en n_{50} . En considérant une ventilation mécanique double-flux et une protection au vent faible, le débit moyen des infiltrations d'air parasites serait de l'ordre de 0,06 vol/h (calculs selon la norme EN 13790).

²⁷ La surface prise en compte dans l'indicateur Q_4 correspond à la surface totale des parois déperditives (au sens réglementaire, soit les parois donnant sur l'extérieur hors plancher bas).

Enfin, les consommations mobilières ne sont prises en compte que de manière qualitative, avec une exigence d'utiliser des appareils électroménagers et d'éclairage de la meilleure classe disponible d'après la déclaration E de l'Union Européenne (MINERGIE 2011).

1.1.2.3. LES LABELS *PASSIVE HOUSE PLUS* ET *PREMIUM*

Le *Passive House Institute* (PHI) est un institut de recherche indépendant coordonné par le Dr. Wolfgang Feist, pionnier dans le concept du bâtiment passif (Feist 1988) et ayant notamment montré la faisabilité du concept dans ses travaux de doctorat (Feist 1993). Un label nommé « *Passive House* » a ainsi été historiquement (il fête ses 25 ans en 2016) proposé par le PHI, dont les exigences sont les suivantes :

- Des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m²/an ou une puissance de chauffage installée inférieure à 10 W/m².
- Des besoins de climatisation inférieurs à 15 kWh/m²/an plus une allocation additionnelle pour la déshumidification de l'air (fonction du climat, du taux de renouvellement d'air, et des sources d'humidité internes) ou une puissance de climatisation installée inférieure à 10 W/m².
- Un besoin total en énergie primaire inférieur à 120 kWh/m²/an. Ce besoin inclut l'ensemble des postes à savoir : le chauffage, le refroidissement, l'ECS, l'éclairage, les auxiliaires et les appareils électriques.
- Une étanchéité à l'air, exprimée en n_{50} , inférieure à 0,6 vol/h, sous une différence de 50 pascals de pression.
- Moins de 10 % d'heures de surchauffe sur une année (avec une température d'inconfort fixée à 25 °C).

Depuis 2015, deux nouveaux labels, « *Passive House Plus* » et « *Passive House Premium* », ont été introduits par le PHI (Figure 1-2), axés sur l'utilisation des énergies renouvelables, et permettant de valoriser les constructions ayant fait le choix d'être productrices d'énergie. Ces labels intègrent une nouvelle procédure d'évaluation énergétique basée sur l'énergie primaire renouvelable (Passive House Institute 2015). Les facteurs de conversion d'énergie finale en énergie primaire jusqu'alors utilisés sont ainsi remplacés par des facteurs de conversion en énergie primaire renouvelable (abrégiée PER pour « *Primary Energy Renewable* »), représentant la part d'utilisation directe, de stockage, et de conversion des énergies renouvelables utilisées par bâtiment (Feist 2015). Ces facteurs sont construits à partir des résultats de 700 sites climatiques, et calculés par usage. Ils s'inscrivent dans une perspective à long terme (Breitfeld 2015) où une transition complète vers les énergies d'origine renouvelable (photovoltaïque, turbine éolienne, hydroélectricité, et biomasse durable) est supposée, avec des

capacités de stockage suffisantes. L'adéquation temporelle entre demande et production énergétiques est prise en compte par l'intermédiaire de pertes au sein de la chaîne énergétique. Si l'énergie produite ne peut être utilisée directement, elle doit temporairement être stockée (à court terme, ou à un niveau saisonnier). Plus ce stockage sera long, plus les pertes seront importantes, et le facteur en PER grand. Cette nouvelle approche apporte ainsi une évolution relativement fondamentale dans le processus de conception dans le sens où les besoins énergétiques des différents usages ne sont à présent plus considérés comme équivalents, ce qui peut impliquer une modification des priorités en conception. Pour ces deux nouveaux labels, les exigences du label originel (renommé « *Passive House Classic* ») sont reprises sauf celle sur le besoin total en énergie primaire qui est remplacée par une exigence sur le besoin total en énergie primaire renouvelable (incluant toujours l'ensemble des postes énergétiques).

À cela s'ajoute l'obligation de générer une certaine quantité d'énergie primaire renouvelable par rapport à l'emprise au sol du bâtiment. Il est à noter que les fournisseurs d'électricité renouvelable peuvent être pris en compte. Les valeurs limites fixées pour cette double exigence sont présentées à la Figure 1-2. La production d'énergie primaire renouvelable doit être supérieure au besoin total dans les deux cas, à savoir respectivement 60 kWh/m²/an contre 45 pour le label « *Passive House Plus* », et 120 kWh/m²/an contre 30 pour le label « *Passive House Premium* ». L'idée du PHI qui sous-tend l'exigence sur la demande est que les énergies renouvelables sont moins denses que leurs homologues fossiles, et auront ainsi une incidence non négligeable en matière d'emprise au sol, comme par exemple un champ d'éoliennes ou une surface recouverte de panneaux photovoltaïques. Or, cette ressource d'espace sera de plus en plus limitée en supposant une démographie croissante, ce qui nécessite de l'économiser. La conformité à ces exigences est vérifiée avec le logiciel « *Passive House Planning Packaging* » (PHPP)²⁸ mettant en œuvre une méthode d'approximation mensuelle.

²⁸ http://www.passiv.de/en/04_phpp/04_phpp.htm



Figure 1-2. Exigences des labels Passive House Classic, Plus, et Premium concernant la demande et la génération d'énergie primaire renouvelable, tirée de Passipedia (2016)

1.1.2.4. ANALYSE COMPARATIVE

Si un horizon temporel annuel commun peut tout d'abord être noté (bilan annuel), la frontière physique du système considéré varie : les labels *Effinergie* et *MINERGIE* délimitent la prise en compte d'installations de production d'énergie à l'échelle de la parcelle voire du bâtiment alors que les labels *Passive House* autorisent les fournisseurs d'électricité renouvelable hors site. Les frontières du bilan sont également différentes : les labels *Effinergie* et *Passive House* intègrent effectivement l'ensemble des usages contrairement au label *MINERGIE*, n'exigeant pas une prise en compte quantitative des usages mobiliers. De plus, les exigences sont principalement portées sur la phase d'exploitation du bâtiment, hormis pour l'énergie grise où le label *Effinergie* impose juste la réalisation du calcul, et où le label *MINERGIE* fixe une valeur limite peu contraignante. Le raisonnement s'effectue via deux exigences séparées, et non sur le cycle de vie global. Les conditions aux limites, comme par exemple les données météorologiques, les exigences sur le confort ou encore la surface de référence du bâtiment, diffèrent également entre les labels. Si un consensus existe sur le choix de comptabiliser en énergie primaire, les facteurs de pondération, statiques et symétriques pour tous, ne présentent pas les mêmes valeurs : le label suisse attribue un facteur 2 pour l'électricité et 0,7 pour la biomasse en général, alors que le label français fixe 2,58 pour l'électricité et 0 pour le bois (ou 0,5 pour un réseau de chaleur majoritairement basé sur la

biomasse). Si, par ces choix en partie politiques, une filière énergétique d'origine renouvelable peut être favorisée par rapport à une autre d'origine fossile, la réalité physique de ces facteurs reste à conserver pour éviter de conduire à des aberrations pratiques. Le bois doit par exemple être considéré comme une ressource limitée (au contraire du solaire entre autres), car un usage trop massif et non géré durablement de cette ressource pourrait finalement entraîner une surexploitation des forêts, même si pour l'heure en France, cette filière possède une marge de développement significative²⁹. À des degrés différents, les trois labels imposent des exigences sur l'enveloppe, notamment par des seuils sur les besoins de chauffage ou l'étanchéité à l'air, mais aussi sur la performance énergétique globale du bâtiment. Les labels allemands se distinguent par l'approche du PHI tournée vers les besoins plutôt que les consommations. L'esprit de ces labels est d'avoir des bâtiments sobres avant d'être positifs. Une exigence séparée sur la demande et la production est dans ce but imposée. Ces labels posent ainsi la conception passive comme un pré-requis à la différence des labels français et suisse dont l'exigence porte sur le bilan global, offrant une plus grande flexibilité dans la conception. Enfin, il peut être observé qu'un choix commun de favoriser l'utilisation d'énergies renouvelables a été fait, malgré des disparités dans les approches : bilan intégrant une consommation en énergie primaire non renouvelable pour le label *Effinergie*, exigence maximale de besoins en énergie primaire renouvelable pour les labels « *Passive House* », et prise en compte explicite uniquement pour les installations photovoltaïques dans le label *MINERGIE* (une valeur limite assouplie est mise en place dans le cas d'un système solaire thermique combinée à un système de chauffage utilisant de la biomasse avec stockage).

À travers l'analyse comparative de ces trois types de label, un ensemble d'éléments essentiels à une définition a pu être illustré. Cette analyse montre également une diversité importante dans les approches possibles, invitant à construire un cadre cohérent pour élaborer et appréhender de manière systématique les multiples définitions du BEPOS.

1.1.3. Cadres cohérents de définitions d'un BEPOS

1.1.3.1. TRAVAUX DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE

À l'échelle internationale, des travaux ont été menés sur la définition des BEPOS dans le cadre de l'annexe 52 du programme ECBCS (« *Energy Conservation in Buildings and Community Systems* ») et de la tâche 40 jointe du

²⁹ <http://www.planetoscope.com/forets/1362-croissance-de-la-foret-en-france.html>

programme SHC (« *Solar Heating and Cooling* ») de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) intitulée « *Towards Net Zero Energy Solar Buildings* ». Ces travaux sont notamment issus de la sous-tâche A ayant pour objectif d'établir un concept international et reconnu de « *Net Zero Energy Building* » (NZEB) basé sur une méthodologie commune. Si le terme général pour désigner un BEPOS sur le plan international est « *Zero Energy Building* » (ZEB), ces travaux se focalisent sur les ZEB connectés, *i.e.* équilibrant leurs besoins énergétiques annuels avec une production sur site et des échanges avec un réseau énergétique. Le terme anglais « *Net* » fait ainsi référence au réseau énergétique (généralement électrique). Les bâtiments autonomes (« *off-grid ZEB* »), c'est-à-dire les bâtiments répondant pleinement à leurs besoins énergétiques annuels avec une production d'énergies renouvelables sur site, ne sont ainsi pas traités même s'ils appartiennent à la catégorie des ZEB. L'ilot de bâtiments est également écarté, même si une terminologie a été définie, « *Net Zero Energy Cluster* » (Net ZEC), et que ce concept présente des avantages évidents : mutualisation des installations, foisonnement des besoins permettant une meilleure autoconsommation de la production, etc.

Au sein de la sous-tâche A, l'activité A1 « Cadre de travail sur la définition de NZEB » vise plus précisément, à partir des approches nationales existantes, à développer un cadre de travail international sur la définition des bâtiments zéro énergie. L'activité A3 « Interactions avec le réseau » a quant à elle pour but d'étudier les interactions du bâtiment connecté avec le réseau, et la non-synchronisation dans le temps entre les besoins du bâtiment et la production d'électricité locale. La synthèse de ces travaux sur l'élaboration d'un cadre cohérent de définitions du NZEB peut être présentée selon cinq points-clés.

❖ 1. Périmètre du système

Définir le périmètre du système bâtiment est indispensable pour comptabiliser les flux énergétiques à la frontière de ce système.

La *frontière physique* délimite un bâtiment, une parcelle ou un ensemble de bâtiments. Marszal et al. (2010) proposent de distinguer les systèmes de génération d'énergie en deux catégories :

1. ceux « sur site » ;
2. ceux « hors site », avec une classification selon le niveau de « proximité » (Figure 1-3) permettant de les intégrer ou non dans le bilan, éventuellement de manière différenciée par rapport à ceux « sur site ». Cela inclut également les fournisseurs d'énergie.

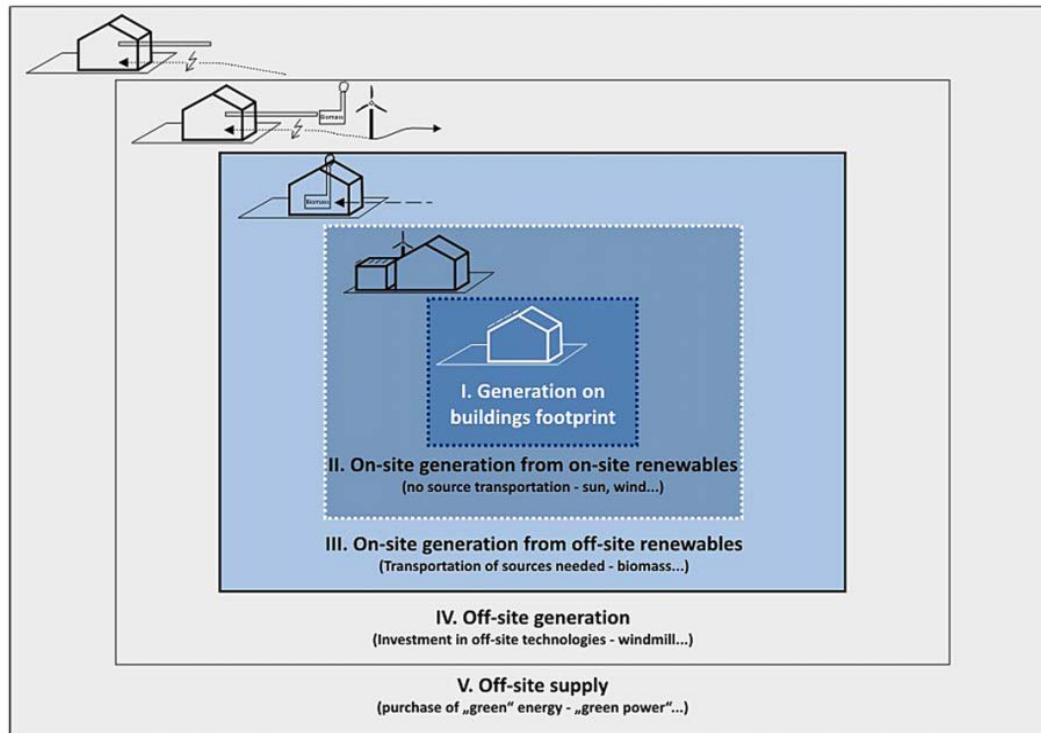


Figure 1-3. Options possibles de fourniture d'ENR, tirée de Marszal et al. (2010)

Un NZEB étant par définition associé à un réseau, il convient de spécifier les caractéristiques du réseau disponible : bidirectionnel, nature (électrique, chaleur, etc.), puissance ou niveaux de température.

Les *frontières du bilan* concernent les différentes consommations à inclure. Généralement, il s'agit de l'énergie consommée en exploitation sur une année et il faut préciser les postes considérés : chauffage, climatisation, ECS, éclairage, et électricité spécifique (ou consommation dite « mobilière »). Si une revue de (Sartori et Hestnes 2007) montre que la phase d'utilisation reste prépondérante pour les bâtiments à basse consommation, le recours à des quantités supplémentaires de matériaux (isolation p. ex.) et d'équipements techniques (pompe à chaleur ou panneaux photovoltaïques p. ex.) pour construire des NZEB invite toutefois à prendre en compte l'énergie grise, voire plus globalement les impacts environnementaux des matériaux et technologies employés. Voss et al. (2011) soulignent par exemple que la part de l'énergie grise (en incluant les mesures de remplacement et rénovation) peut correspondre à 20 % à 30 % de l'énergie primaire totale pour un bâtiment énergétiquement performant, sur une durée de vie de 80 ans. Cette proportion peut même être majoritaire, c'est par exemple le cas des deux maisons mitoyennes de Formerie, premières maisons certifiées « Passive House » de France (Thiers et Peuportier 2012). Pour l'additionner à l'énergie en phase d'exploitation, l'énergie grise peut être « annualisée ». Une évaluation plus globale par une analyse de cycle de vie peut être aussi envisagée permettant alors d'intégrer pleinement les étapes de

construction, d'entretien et de démolition du bâtiment. Des incertitudes s'ajoutent néanmoins sur les hypothèses prises, notamment en fin de vie (recyclage).

Les *conditions aux limites* du système sont également à détailler. Il s'agit de références concernant la typologie du bâtiment, l'utilisation de l'espace, les données climatiques ou encore les exigences de confort. Pour comparer des projets entre eux, ces informations doivent être connues. En effet, une année climatique différente (plus chaude par exemple) ou un indicateur d'utilisation de l'espace différent (nombre de m² par personne) ne permettront pas une comparaison directe.

❖ 2. Système d'unités

Le *système d'unités* permet d'évaluer de manière cohérente l'ensemble de la chaîne énergétique, en convertissant les unités de différents vecteurs énergétiques selon les propriétés des sources énergétiques, les rendements des systèmes mis en œuvre (centrale électrique, chaufferie...), ceux de transmission et de distribution des réseaux.

Torcellini et al. (2006) proposent par exemple quatre types de métriques :

- **À zéro énergie sur site** (« *Net Zero Site Energy* ») : le bâtiment consomme au plus ce qu'il produit en énergie renouvelable sur site (bilan réalisé en énergie finale).
- **À zéro énergie source** (« *Net Zero Source Energy* ») : le bâtiment consomme au plus ce qu'il produit ou importe (via une source extérieure au site), comptabilisé en énergie renouvelable. L'énergie considérée à la source représente l'énergie primaire, intégrant ainsi les facteurs de conversion associés aux types d'énergie utilisés.
- **À zéro coût énergétique** (« *Net Zero Cost Energy* ») : la facture énergétique du bâtiment est au moins annulée grâce aux exports énergétiques réalisés.
- **À zéro émission** (« *Net Zero Energy Emissions* ») : le bâtiment produit (ou importe) au moins assez d'énergie renouvelable pour compenser les émissions liées à sa consommation d'énergie annuelle. Les énergies importée et exportée sont ainsi à multiplier par des coefficients spécifiques aux émissions des systèmes de production sur site et du réseau énergétique. Le terme émissions n'étant pas précisé, il peut se référer aux émissions de GES comme aux émissions d'autres substances dans l'environnement (p.ex. dioxyde de soufre ou phosphate).

D'autres *métriques* existent telles que : la part non renouvelable de l'énergie primaire (incluant éventuellement les énergies renouvelables limitées en flux comme le bois), l'exergie (Kilkis 2007), des crédits environnementaux ou encore des métriques choisies pour des raisons politiques (comme par exemple le fait d'attribuer un facteur de conversion en énergie primaire nul au bois pour promouvoir l'utilisation de cette ressource malgré la finitude de son stock).

Une notion de *symétrie* est introduite concernant les facteurs de pondération de chaque vecteur énergétique lors du bilan entrée/sortie à la frontière du système. Prenons l'exemple de l'électricité et d'un système de génération photovoltaïque sur site. Si l'énergie grise est incluse dans les frontières du bilan, l'idée est de considérer que l'énergie exportée sur le réseau permet d'éviter une production équivalente ailleurs sur le réseau (méthode des impacts évités). Les quantités exportées et importées peuvent alors être comptabilisées de manière symétrique. Au contraire, si l'énergie grise n'est pas incluse, il faudrait alors prendre en compte un « effet compensatoire » pour chaque kWh d'électricité exporté afin d'intégrer l'énergie grise due à la production des panneaux. Dans ce cas, la comptabilité des énergies importée et exportée sera asymétrique : les énergies importée et exportée seront pondérées par des coefficients différents. Une autre méthode consiste à considérer le bâtiment et l'exportation d'électricité comme des coproduits. Si $x\%$ de la production locale est consommée par le bâtiment (autoconsommation), alors seulement $x\%$ de l'énergie grise est comptabilisée et l'énergie exportée n'est pas prise en compte. Des facteurs asymétriques peuvent également être considérés pour favoriser une technologie par exemple (tarifs d'achat plus élevés que ceux de revente d'une même énergie). L'avantage de la méthode des impacts évités est d'obtenir, pour un bâtiment donné, un bilan robuste au changement d'échelle (du bâtiment seul au quartier dans lequel il se situe).

Ces facteurs de conversion en énergie primaire ou en équivalent CO₂ varient dans le temps et l'espace. Par exemple, le kWh électrique présentera des impacts en matière d'émissions de GES selon les périodes de l'année, avec typiquement des pics lors des soirées d'hiver où des systèmes de production tels que des centrales à charbon sont sollicitées pour répondre à la forte demande électrique. En analyse de cycle de vie (ACV), Ce mix énergétique de la production de l'électricité peut être considéré constant en estimant des moyennes sur une période de temps donnée (ACV statique) ou variant à un chaque pas de temps, horaire généralement (ACV dynamique).

❖ 3. Bilan NZEB

Pour réaliser le bilan, il convient de fixer une *période de bilan* et un *type de bilan*. Généralement, les calculs sont réalisés sur une période annuelle, pour couvrir l'ensemble des saisons. Néanmoins, il est possible de choisir des périodes plus courtes (par exemple les semaines les plus froides d'hiver de manière à vérifier l'adéquation du bâtiment et des systèmes dans cette période critique) ou plus longue (par exemple quelques décennies afin d'intégrer l'ensemble du cycle de vie du bâtiment).

Sartori et al. (2012) proposent trois *types de bilan* illustrés à la Figure 1-4 :

1. bilan « **import/export** » ;

2. bilan « **charge/production** » ;
3. bilan « **net mensuel** ».

Le bilan « import/export » consiste à sommer, pour chaque vecteur énergétique, la différence pondérée entre l'énergie exportée sur le réseau et l'énergie importée du réseau. Le bâtiment et les unités de production d'énergie sur site sont vus depuis l'extérieur comme un unique système. L'énergie produite autoconsommée par le bâtiment est ainsi intégrée dans ce bilan, à la différence du bilan « charge/production ». La difficulté d'estimer les consommations des occupants (éclairage, appareils électriques, etc.) à une échelle temporelle relativement fine explique que la plupart des réglementations impose une exigence sur un bilan « charge/production » plutôt que « import/export » (Marszal et al. 2011). Cette approche n'intégrant pas les interactions avec le réseau revient à considérer que la charge du bâtiment est entièrement satisfaite par l'énergie fournie par le réseau, et que la production sur site est pleinement exportée vers ce dernier. Une troisième alternative possible correspond à un bilan mensuel entre charge et production (Heinze et Voss 2009; Voss et al. 2011). Les résidus mensuels sont sommés pour obtenir un indicateur annuel donnant une première estimation de l'interaction avec le réseau : plus les écarts mensuels entre charge et génération seront importants, plus les échanges saisonniers avec le réseau seront déséquilibrés. Cet indicateur peut être vu comme un bilan mensuel « charge/production » ou bien un bilan « import/export » avec une autoconsommation mensuelle virtuelle.

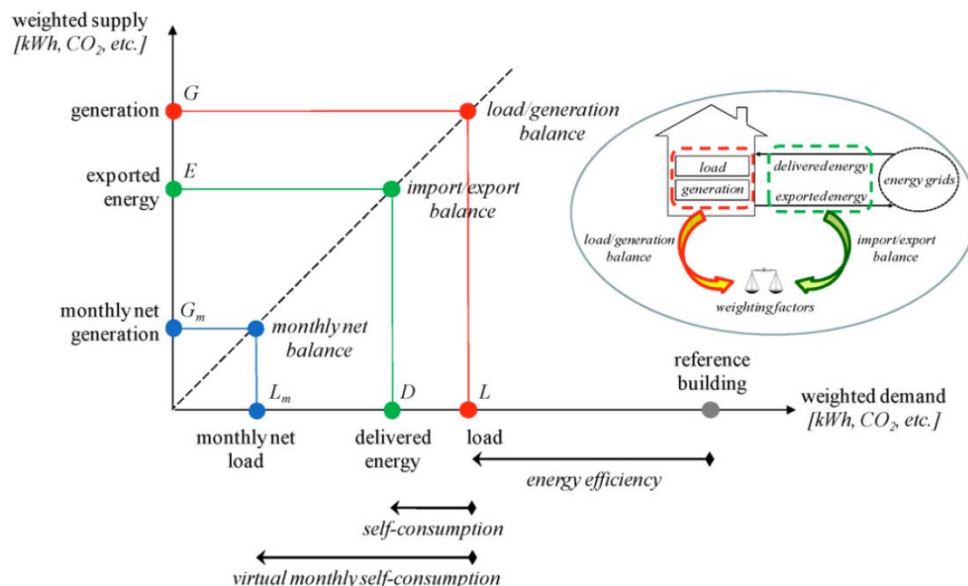


Figure 1-4. Représentation des trois types de bilan NZEB, tirée de Sartori et al. (2012)

Les trois bilans sont cohérents entre eux et présentent des avantages et des inconvénients. Le bilan « import/export » prend en compte les interactions avec le

réseau mais nécessite d'estimer l'autoconsommation avec une simulation détaillée (au pas horaire voire infra-horaire) à l'inverse du bilan « *generation/load* », facile à implémenter mais ne donnant pas d'information sur les interactions avec le réseau. Le bilan mensuel constitue un compromis entre ces deux alternatives en ne requérant que des valeurs mensuelles et permettant un aperçu grossier des interactions avec le réseau. Pour tous les bilans, le système d'unités est intégré via l'application de facteurs de pondération pour chaque source énergétique.

En complément de cette exigence sur un type de bilan, Voss et al. (2011) ont mis en évidence, par l'analyse d'un nombre important de ZEB existants, le rôle de l'*efficacité énergétique*³⁰ dans le succès des projets. Des valeurs contraignantes sur la performance de l'enveloppe ou des équipements sont ainsi adoptées dans la plupart des réglementations nationales ou des labels de certification (Sartori, Candanedo, et al. 2010). L'article 4 de la directive européenne 2010/31/UE invite d'ailleurs « *Les États membres [à prendre] les mesures nécessaires pour garantir que des exigences minimales en matière de performance énergétique des bâtiments ou des unités de bâtiment soient fixées en vue de parvenir à des niveaux optimaux en fonction des coûts* ». Cette notion d'efficacité au regard des moyens économiques mis en œuvre est centrale dans la définition des BEPOS. C'est effectivement elle qui orientera le processus de décision lors de la conception de ces bâtiments.

De la même manière, des exigences réglementaires sur la production énergétique peuvent être proposées, en particulier avec un seuil minimal dans la part de la demande du bâtiment couverte par des énergies renouvelables. Des pondérations peuvent être mises en place pour des raisons stratégiques ou politiques afin de favoriser une filière vis-à-vis d'un contexte national particulier.

❖ 4. Adéquation temporelle entre demande et production énergétiques

De par sa définition, un NZEB est un bâtiment connecté à un réseau énergétique (généralement électrique), et fortement susceptible d'être producteur d'énergie. Un échange bidirectionnel avec le réseau est alors implicitement considéré : le bâtiment importera de l'énergie du réseau sur certains pas de temps et en injectera à d'autres. Si un équilibre annuel est visé, les écarts mensuels, journaliers, horaires voire infra-horaires peuvent être

³⁰ L'efficacité est à distinguer de l'efficacités. L'efficacité mesure la capacité à parvenir à des objectifs fixés tandis que l'efficacité met en regard cette efficacité avec les moyens déployés pour atteindre ces objectifs. Prenons l'exemple d'un bâtiment non isolé à réhabiliter en BEPOS. Il est possible d'installer une surface de panneaux photovoltaïque très importante pour atteindre un bilan énergétique positif sans améliorer l'enveloppe. La mesure sera efficace puisque l'objectif a été atteint. Par contre, la mesure sera peu efficace car, pour un bilan énergétique identique, une isolation de l'enveloppe aurait coûté moins cher (au moins pour les premiers centimètres) que l'installation de panneaux supplémentaires.

importants. À grande échelle, la généralisation de ce type de bâtiments pourrait conduire à la gestion de nouvelles sollicitations sur le réseau. De manière analogue à l'hiver où les pointes de consommation électrique peuvent être problématiques pour le gestionnaire du réseau, les excédents de la production solaire en été pourraient être en effet également un facteur de stress pour le réseau. Dans le même temps, avec le déploiement des « réseaux intelligents » (« *smart grids* » en anglais), ces bâtiments, résolument connectés, constituent aussi une opportunité particulièrement intéressante de gestion énergétique optimisée à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Dans tous les cas, il apparaît nécessaire d'étudier la compatibilité des interactions entre les NZEB et le réseau.

Deux catégories d'indicateurs (Voss et al. 2010) sont définis pour caractériser les capacités du bâtiment et du réseau à fonctionner de manière harmonieuse. Il s'agit des indicateurs « *load matching* » et des indicateurs (« *grid interaction* ». La première catégorie est relative à la correspondance temporelle entre la charge du bâtiment et sa production d'énergie sur site. La seconde est le pendant de la première du point de vue du réseau. Elle traduit donc la correspondance temporelle des besoins du réseau avec l'énergie injectée à ce dernier.

Trois indicateurs de type « *load matching* » sont proposés :

1. le taux de couverture (« *load match index* ») ;
2. le taux d'autoproduction (« *load cover factor* ») ;
3. le taux d'autoconsommation (« *supply cover factor* »).

Le **taux de couverture** correspond à la moyenne annuelle du rapport, à chaque pas de temps, entre production et demande énergétiques, majoré par 1 en valeur absolue). Plus ce taux est proche de 1, plus la synchronisation entre la production et la demande énergétique du bâtiment est élevée. Le pas de temps peut être annuel, mensuel, journalier ou horaire par exemple. Plus ce pas sera petit, plus l'adéquation temporelle entre charge et génération sera réduite, et donc le taux faible (Figure 1-5). Des formules plus fines intègrent aussi le stockage et les pertes d'énergie.

Le **taux d'autoproduction** correspond au pourcentage de la demande électrique couverte par la génération sur site. Son expression est proche de celle du taux de couverture à la différence que la demande est ici constante (car intégrée sur toute la durée d'évaluation).

Le **taux d'autoconsommation** représente la fraction (en %) de la production sur site utilisée par le bâtiment. Il traduit la capacité du bâtiment à synchroniser sa consommation avec sa propre production, et dans un sens, à « s'effacer » du réseau.

Les indicateurs de type « *grid interaction* » s'intéressent quant à eux aux échanges d'énergie entre un bâtiment et le réseau vis-à-vis des besoins du réseau. Ces indicateurs sont le plus souvent normalisés par la capacité de

connexion nominale du bâtiment au réseau. De nombreux indicateurs ont été proposés (Salom et al. 2011; Salom et al. 2014) parmi lesquels :

- Le **facteur de capacité** (« *capacity factor* »), traduisant une information sur l'utilisation de la connexion par le bâtiment. Il est calculé en divisant l'énergie échangée avec le réseau par la capacité nominale de connexion. Cet indicateur appartient à la catégorie des indicateurs de pics avec l'indicateur « *génération multiple* » (GM) ou encore le taux de dimensionnement (« *dimensioning rate* » en anglais).
- L'indicateur d'**interaction avec le réseau** (« *grid interaction index* ») correspondant à l'écart-type du flux avec le réseau à chaque pas de temps (*i.e.* énergie exportée moins énergie appelée) sur une année, normalisé par la valeur absolue la plus haute sur l'année (Voss et al. 2010). Cet indicateur vise à caractériser la variabilité des échanges (Figure 1-5) Plus ces échanges sont stables, plus la valeur de l'indicateur tendra vers 0.
- L'indicateur « *grid interaction flexibility* » permet de représenter la **capacité d'adaptation du bâtiment aux besoins du réseau**. Cette flexibilité est calculée par la différence entre deux stratégies extrêmes : la première où la priorité est d'exporter le maximum d'énergie vers le réseau (peu importe les capacités de stockage ou les besoins du bâtiment), la seconde où la priorité est inverse, à savoir réduire au maximum la quantité d'énergie envoyée au réseau (l'autoconsommation ou le stockage sont alors employées préférentiellement). Plus cette flexibilité est grande, plus le bâtiment est en capacité de s'adapter au réseau.
- L'indicateur de **probabilité de dépassement de charge** (« *Loss-of-load probability* ») (Verbruggen et al. 2011), correspondant au pourcentage de temps sur une durée donnée où la production sur site est dépassée par la demande (charge), et qu'un recours au réseau est nécessaire.

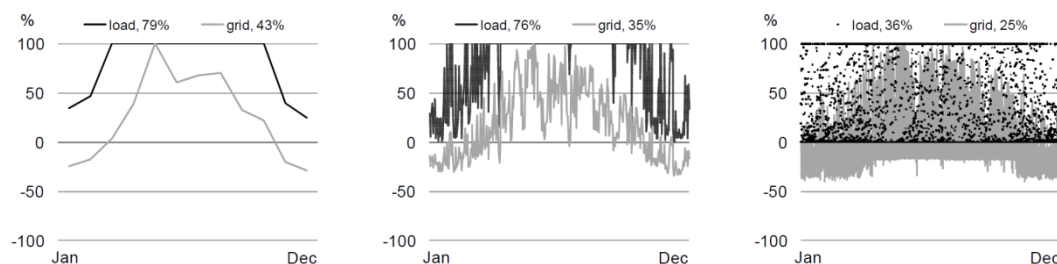


Figure 1-5. Illustration des indicateurs « load matching » et « grid interaction » sur le bâtiment allemand du Solar Decathlon Europe 2010, tirée de Voss et al. (2010)

❖ 5. Mesures et vérification de la performance

Enfin, selon les membres de l'annexe 52, les indicateurs évalués en phase de conception doivent pouvoir être vérifiés en phase d'exploitation. Un dispositif de mesures approprié selon la définition choisie doit alors être mis en œuvre. Une comptabilisation de l'énergie importée et délivrée est préconisée, d'autant qu'elle est facilement applicable si l'ensemble des usages est pris en compte. Il est important de prévoir les caractéristiques (résolution, fréquence, etc.) des capteurs en fonction des indicateurs à suivre. Le suivi d'indicateurs concernant le confort de l'ambiance intérieure (température, QAI³¹, etc.) est également conseillé même si cela alourdit le protocole de mesure. D'un autre côté, il pourrait aussi servir, dans un contexte de garantie de performance énergétique, à expliquer les écarts entre consommations observées et consommations estimées en conception grâce à des mesures sur les conditions météorologiques, l'occupation du bâtiment, etc. Des arbitrages économiques et techniques, propres à chaque concept sont à mener dans l'élaboration de ce protocole.

1.1.3.2. LE PROJET DE NORME CEN PREN 15603

À l'échelle européenne, le Comité Européen de Normalisation (CEN) a été mandaté (M480) par la Commission européenne pour faciliter l'application de la directive européenne 2010/31/EU sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD 2010) par les états membres, et notamment l'article 2 stipulant que tous les nouveaux bâtiments devront être « quasiment à zéro énergie d'ici 2020 » (« *nearly zero energy* »), c'est-à-dire « ayant des performances énergétiques très élevées où 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 sur site ou à proximité ». Si cette définition conceptuelle pose une première pierre vers cette nouvelle génération de bâtiments, des règles techniques claires et sans ambiguïté sont attendues pour orienter et inciter les professionnels dans le développement de solutions

³¹ QAI : Qualité de l'Air Intérieur

adaptées. Les travaux du CEN visent ainsi un double objectif : à la fois préciser et compléter les exigences énoncées par la directive afin de proposer une définition commune et une méthode d'évaluation transparente permettant de favoriser concrètement son déploiement, et à la fois conserver un cadre de définition suffisamment générique et flexible pour que les états membres puissent en traduire une déclinaison nationale contextualisée, avec des adaptations régionales voire locales. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'un projet de norme européenne, sous la dénomination prEN 15603 (CEN 2013). Ils peuvent être décomposés en trois contributions principales (Zirngibl 2014) :

1. La première sur le **périmètre du système** : une définition des termes « sur site », « à proximité », et de la part des énergies renouvelables (« *renewable energy ratio* » (RER) en anglais) est proposée.
2. La seconde sur le **système d'unités** et les **bilans** : une proposition d'évaluation en quatre étapes du standard nZEB est proposée, avec différents facteurs de pondération.
3. La troisième sur les caractéristiques de l'**adéquation temporelle entre demande et production énergétique** : des indicateurs en lien avec les interactions du bâtiment avec le réseau sont proposés.

❖ 1. Périmètre du système

Le CEN définit par « sur site » des productions localisées sur le bâtiment et sa parcelle. Dans le cas d'un site avec plusieurs bâtiments, il est essentiel de préciser quelle parcelle de terrain est allouée à chaque bâtiment, de manière à ne pas comptabiliser deux fois les sources d'énergie (p. ex. la production de panneaux photovoltaïques installés sur un garage commun). Cette définition de « sur site » se fonde sur un lien fort et unique avec le bâtiment.

Pour la définition de « à proximité », la définition proposée par le CEN se base sur la possibilité propre à un quartier ou à une échelle locale d'utiliser une ENR. Une connexion dédiée et un équipement spécifique caractérisent ce lien. Des coefficients particuliers de conversion d'énergie finale à primaire peuvent être calculés afin de quantifier ce lien spécifique entre le bâtiment et cette source énergétique. La définition de « à proximité » offre la possibilité de mutualiser les investissements pour permettre d'augmenter l'utilisation des ENR, d'améliorer la performance énergétique ou encore de faire des économies d'échelle (p. ex. une chaudière biomasse collective).

Le CEN propose également un indicateur pour calculer la part d'énergies renouvelables mises en œuvre. La directive indique en effet que « la quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise [des nZEB] devra être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables ». Un rapport entre l'énergie primaire renouvelable produite (calculée avec des facteurs de conversion en énergie primaire renouvelable, voir

§ suivant) et la consommation totale en énergie primaire (calculée avec des facteurs de conversion en énergie primaire totale, voir également § suivant) est proposé. Ce taux peut être distingué selon le périmètre (p. ex. « sur site » ou « à proximité ») et les énergies importées ou produites correspondantes.

❖ 2. Système d'unités et bilans

En combinant les exigences fixées par l'EPBD, un cadre d'évaluation cohérent des nZEB est proposé par le CEN. Il se décline en quatre étapes devant toutes être passées avec succès pour que le bâtiment soit considéré comme « quasiment à zéro énergie » (Figure 1-6). Étape par étape, la méthodologie d'évaluation progresse des besoins du bâtiment jusqu'à une performance énergétique globale exprimée en énergie primaire.

La première étape vise à vérifier que le bâti a été bien conçu, en s'affranchissant des systèmes. L'exigence est portée sur les besoins énergétiques du bâtiment et peut s'apparenter à celle de la RT 2012 avec le coefficient B_{bio} . Les besoins sont à calculer avec la norme EN ISO 13790 (ISO 2012), et intègrent notamment la qualité de l'enveloppe (isolation, menuiseries, étanchéité à l'air, ponts thermiques...), la conception bioclimatique (apports solaires, éclairage naturel...), l'inertie, et une qualité d'air intérieur satisfaisante.

La seconde étape a pour but de contrôler la bonne performance des équipements (chauffage, ventilation, climatisation, ECS, éclairage), sans compensation possible avec la production d'énergie sur site. Ces systèmes techniques utilisant des vecteurs énergétiques différents, l'exigence est exprimée en énergie primaire afin de sommer les différentes consommations sous une même unité. Ces facteurs de conversion permettent de prendre en compte les pertes de certains systèmes qui sont en dehors du périmètre du bâtiment, comme par exemple les radiateurs électriques où la majorité des pertes se situe dans la génération et le transport de l'électricité.

La troisième étape a pour objectif d'assurer qu'une part minimale de la consommation énergétique totale est couverte par des énergies renouvelables, comme imposée par l'EPBD. Pour ce faire, les facteurs de conversion en énergie primaire de chaque vecteur énergétique sont divisés en deux composantes :

- la part d'énergie **P**rimaire **ren**ouvelable, nommée $f_{P,ren}$;
- et la part d'énergie **P**rimaire **non renouvelable**, nommée $f_{P,nren}$.

La somme de ces deux composantes correspond aux facteurs de conversion en énergie primaire **totale** usuellement utilisés (p. ex. dans les RT françaises actuelles). Sauf précision explicite, l'adjectif « totale » est généralement implicite, et son emploi économisé. L'exigence de la troisième étape est exprimée sur la consommation totale en énergie primaire non renouvelable, via l'application des facteurs $f_{P,ren}$ et $f_{P,nren}$. À cette étape, l'énergie produite sur site et consommée

(i.e. autoconsommée) pour l'un des services du bâtiment (chauffage, refroidissement, ECS...) est prise en compte. L'indicateur proposé est nommé « *Renewable Energy Ratio* » (RER) en anglais, et correspond au rapport entre consommation d'énergie primaire renouvelable et énergie primaire totale consommée par le bâtiment.

La quatrième et dernière étape vise à vérifier une performance globale du bâtiment, via une exigence sur un bilan énergétique. La somme des énergies exportées pondérées par un facteur pour chaque vecteur énergétique est soustraite à la somme des énergies importées pondérées également par un facteur pour chaque vecteur énergétique. Un système de pondération en énergie primaire non renouvelable est proposé, conformément à ce qui est imposé par la directive.

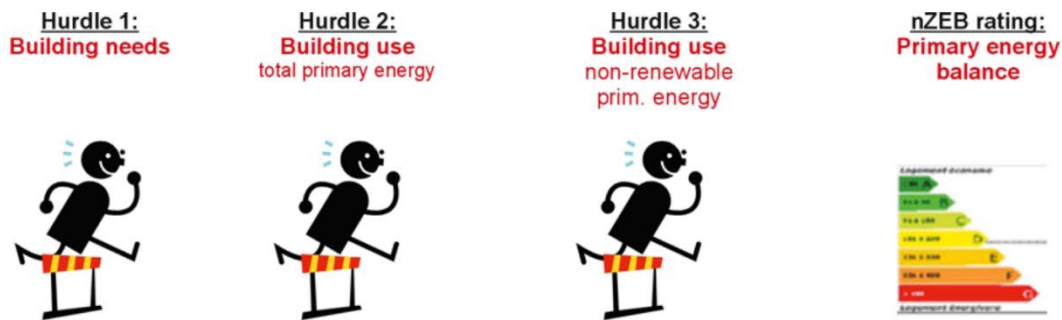


Figure 1-6. Les quatre étapes pour atteindre le « nearly zero energy building » (nZEB) selon le prEN 15603, tirée de Zirngibl (Zirngibl 2014)

❖ 3. Adéquation temporelle entre demande et production énergétiques

Pour caractériser les échanges du bâtiment avec le réseau, le CEN propose, comme le groupe de travail de l'AIE, de calculer les taux d'autoproduction (« *load cover factor* ») et d'autoconsommation (« *supply cover factor* »). Dans l'annexe F du projet de norme prEN 15603 :2014, ils sont appelés respectivement « *use matching fraction* » et « *production matching fraction* » et leurs expressions sont données par les équations (1.2) et (1.3) ci-après.

$$f_{use,match} = \frac{\sum_i E_{pr,el,used,E_{pus,i}} + \sum_i E_{pr,el,used,nE_{pus,i}}}{\sum_i E_{E_{pus,el,i}} + \sum_i E_{exp,el,used,nE_{pus,i}}} \quad (1.2)$$

$$f_{pr,match} = \frac{\sum_i E_{pr,el,used,E_{pus,i}} + \sum_i E_{pr,el,used,nE_{pus,i}}}{\sum_i E_{pr,el,used,i}} \quad (1.3)$$

avec :

- $E_{pr,el,used,EPUS,i}$: la part d'électricité produite sur site et utilisée pour les usages considérés par l'EPBD³² au pas de temps i ;
- $E_{pr,el,used,nEPUS,i}$: la part d'électricité produite sur site et utilisée pour les usages non considérés par l'EPBD au pas de temps i ;
- $E_{EPUS,el,i}$: l'électricité consommée pour les usages considérés par l'EPBD au pas de temps i ;
- $E_{exp,el,used,nEPUS,i}$: la part d'électricité exportée qui est utilisée pour les usages non considérés par l'EPBD dans le bâtiment au pas de temps i ;
- $E_{pr,el,used,i}$: l'électricité produite sur site et à l'intérieur du domaine choisi au pas de temps i .

Pour le CEN, le pas de temps horaire apparaît comme le plus réaliste. Tout comme les propositions de l'AIE, le CEN évoque l'indicateur d'interaction avec le réseau (« *grid interaction* ») afin de mesurer un « stress moyen » du réseau.

Un indicateur inédit est également proposé, nommé « *reuse production matching fraction* », et pouvant être traduit par « indice de réutilisation de l'énergie exportée ». En effet, l'électricité exportée vers le réseau, peut partiellement être réutilisée plus tard dans le temps. Le réseau peut ainsi être vu comme un système de stockage, permettant de déphaser en partie la demande énergétique de la production. L'indicateur est calculé selon l'équation :

$$f_{reuse,match} = \frac{E_{exp,el,tmp,an}}{\sum_i E_{pr,el,i}} \quad (1.4)$$

avec :

- $E_{exp,el,tmp,an}$: la part d'électricité exportée sur l'année au réseau, et récupérée par le bâtiment à un pas de temps ultérieur ;
- et $\sum_i E_{pr,el,i}$: la quantité totale d'électricité produite sur l'année.

1.1.3.3. LA CONTRIBUTION DE L'ASSOCIATION REHVA

L'association REHVA fédère en Europe les associations de chauffage, de ventilation et de climatisation dont l'AICVF (Association des Ingénieurs en Climatique, Ventilation et Froid) en France. Elle participe depuis 2014 à une définition technique des nZEB en collaboration avec le CEN. Basée sur le projet de norme prEN 15603 (respectant et complétant les prérogatives de l'EPBD), la contribution de REHVA pour les états membres se veut plus opérationnelle que les propositions du CEN. Là où plusieurs éléments du projet de norme sont laissés optionnels ou génériques, l'association REHVA réalise des choix, proposant ainsi une définition plus directement applicable.

³² Usages considérés par l'EPBD : chauffage, refroidissement, ECS et auxiliaires

❖ 1. Périmètre du système

La *frontière physique* du système bâtiment proposée par REHVA est délimitée par les compteurs d'énergie (Figure 1-7), ce qui permet de différencier les productions « sur site » (avant les compteurs) des productions « hors site » (après les compteurs). La comptabilisation des énergies entrantes et sortantes au système correspond donc à celle des énergies importées et exportées sur les réseaux énergétiques. La production « sur site » est ainsi soit autoconsommée soit exportée. Pour les exportations d'énergie, seul le vecteur électrique est pour l'instant considéré par REHVA (les autres étant trop complexes ou peu fréquents). Une extension du périmètre spatial est mise en place dans le cas d'un contrat d'approvisionnement énergétique à partir d'une production « à proximité » (Figure 1-7). Cette possibilité d'étendre la définition au-delà de la parcelle propre au bâtiment rejoint celle proposée par le CEN. REHVA distingue deux cas (Kurnitski 2013b) :

1. Si le contrat participe au développement ou la modernisation d'une unité de production à partir d'énergies renouvelables (p. ex. nouveau réseau de chaleur urbain à partir de biomasse) un facteur de conversion en énergie primaire spécifique à cette unité, pouvant être plus avantageux que celui de l'unité standard correspondante (p. ex. réseau de chaleur urbain existant, et basé majoritairement sur des énergies fossiles), peut être appliqué. En France, ce pourrait être l'exemple d'un contrat souscrit avec Enercoop³³, fournisseur d'électricité 100 % renouvelable.
2. Sinon, l'unité de production est indifférenciée d'une unité distante, et le facteur de conversion en énergie primaire du mix énergétique de l'unité standard correspondante est appliqué.

L'intérêt de distinguer énergie produite « sur site », « à proximité », ou « à distance » est de permettre aux états membres de choisir éventuellement des coefficients de conversion en énergie primaire différents selon la position du système par rapport au périmètre spatial.

Au niveau des *frontières du bilan*, REHVA propose d'ajouter l'éclairage (comme le CEN) et l'électricité spécifique (ou consommations « mobilières ») aux postes imposées par l'EPBD (*i.e.* chauffage, climatisation, ECS et auxiliaires de ventilation). Les véhicules électriques pourraient également être intégrés pour mieux caractériser les interactions avec le réseau si la recharge se situe à l'intérieur de la frontière physique du système. S'il est aisé de mesurer ces consommations en phase d'exploitation, leur estimation en phase de conception nécessite des profils dynamiques de consommations, d'occupation et de

³³ <http://www.enercoop.fr/>

charges internes. Des scénarios basés sur des statistiques à l'instar des fichiers météorologiques sont à envisager.

L'intégration de l'énergie grise est aussi suggérée, même si, selon Voss et al. (2011), le passage d'un bâtiment à basse consommation à un nZEB n'influence pas significativement l'énergie grise comptabilisée puisqu'elle provient majoritairement des matériaux structurels, et à un degré moindre des mesures pour réduire la demande énergétique ou des systèmes de production d'énergie.

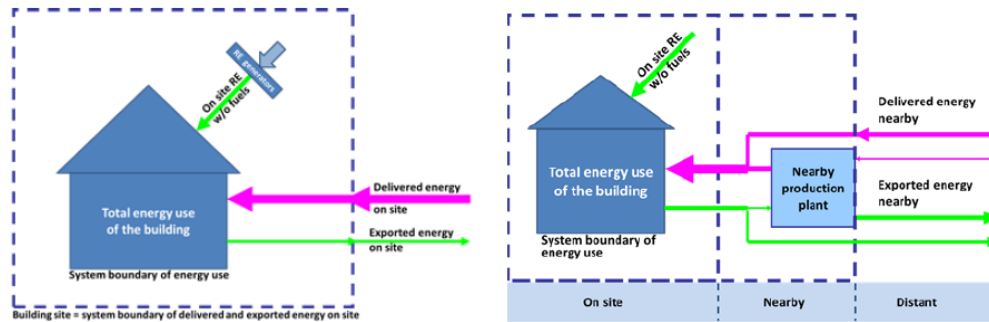


Figure 1-7. Frontières physiques proposées par REHVA : production « sur site » à gauche, production « à proximité » à droite, tirée de Kurnitski (2013a)

❖ 2. Système d'unités

Conformément à l'EBPD, la métrique de base est l'énergie primaire non renouvelable, calculée par l'intermédiaire des facteurs de conversion en énergie primaire non renouvelable ($f_{P,nren}$), définis à l'échelle nationale voire locale de manière à prendre en compte la diversité des systèmes de production, ou dans le but de mettre en œuvre des incitations politiques pour une ressource énergétique. REHVA propose en complément un bilan en émissions de CO₂ équivalent. Pour cette métrique en particulier, les facteurs de pondération actuels, symétriques et constants sur l'année, devront vraisemblablement évoluer dans le futur vers des facteurs asymétriques et variables (pas de temps horaire p. ex.). En effet, les émissions de GES peuvent fortement varier entre les pointes de chauffage l'hiver et des journées fortement ensoleillées l'été (Roux et al. 2016). Ces facteurs plus détaillés permettraient également de mieux évaluer la contribution des énergies renouvelables, et notamment de prendre en compte leur intermittence relativement élevée.

❖ 3. Bilan

Comme introduit avec le périmètre physique proposé, le bilan proposé par REHVA est basé sur les quantités d'énergie importée et exportée sur le réseau électrique, pondérées de coefficients en énergie primaire non renouvelable, en émissions de CO₂ équivalent, ou encore en coûts économiques. Le résultat du

bilan doit alors être comparé à une valeur seuil, définie en fonction du contexte économique et des capacités techniques de chaque pays. Un bilan non nul (au sens de consommations supérieures aux productions) est ainsi autorisé pour atteindre une certaine optimalité économique du concept de nZEB.

Un autre indicateur suggéré concerne le taux de couverture de la consommation par des énergies renouvelables. Il correspond à l'indicateur RER proposé dans le pr EN 15603 qui compare, sous la forme d'un rapport, l'ensemble des sources énergétiques renouvelables à la consommation d'énergie primaire totale. Il est à noter que cela inclut, contrairement au bilan énergétique, l'énergie extraite coté source froide des pompes à chaleur ou celle prélevée à l'air ambiant pour le rafraîchissement naturel. Pour les pompes à chaleur, il serait plus cohérent de ne compter que le surplus d'énergie prélevée à la source froide par rapport à une machine de référence fonctionnant avec un COP égal au facteur de conversion en énergie primaire (p. ex. 2,58 pour la RT).

❖ 4. Adéquation temporelle entre demande et production énergétiques

Deux indicateurs équivalents aux indicateurs « *load cover factor* » et « *supply cover factor* » ont été proposés, nommés respectivement REM (« *Renewable Energy Factor* ») et REF (« *Renewable Energy Matching* »). Cao et al. (2013) en proposent une formulation dans le cas d'une présence d'un stockage électrique ou de l'utilisation du surplus d'électricité produite sur site pour recharger un ballon de stockage d'ECS.

1.1.3.4. CONCLUSION

La diversité existante de définitions du « bâtiment à énergie positive » a conduit à mener des travaux pour rendre plus lisible ce concept, et faciliter sa généralisation. À l'échelle internationale (AIE) ou européenne (CEN et REHVA), un cadre méthodologique commun de définitions a été proposé, permettant une interprétation cohérente des déclinaisons nécessaires du concept selon le contexte énergétique, climatique, et politique propre à chaque pays. Un consensus semble se dégager autour d'un bâtiment généralement connecté à un ou des réseaux énergétiques (*a minima* un réseau électrique), devant respecter une valeur seuil (restant à fixer) par rapport à un bilan annuel en énergie primaire non renouvelable soit entre l'énergie importée et exportée avec ce(s) réseau(x), soit entre l'énergie consommée et l'énergie produite. Le premier bilan prend en compte la part d'énergie produite autoconsommée et est facile à mesurer en phase d'exploitation alors que le second n'intègre pas l'autoconsommation mais est plus aisé à calculer en phase de conception puisqu'il permet de ne pas avoir à considérer des profils horaires ou infra-horaires de consommation pouvant être fortement incertains. Une part des

consommations doit être couverte par une production d'énergie renouvelable située à l'intérieur des frontières physiques du système bâtiment considéré. Cette frontière physique peut être soit le bâtiment lui-même, soit sa parcelle, soit le quartier dans lequel il se situe, voire au-delà si une contribution visant à favoriser le développement des énergies renouvelables est justifiée. À l'instar du périmètre spatial, des choix restent également à faire sur les contributeurs au bilan, notamment sur la prise en compte de l'éclairage dans le résidentiel, de l'électricité dite « mobilière », voire d'usages plus avant-gardistes (p. ex. véhicules électriques). L'efficacité énergétique jouant un rôle-clé dans la réussite des projets, des exigences sur la performance de l'enveloppe et des systèmes sont aussi prévues, en complément de celle sur le bilan annuel. Si ce socle commun donne plusieurs grandes orientations dans la conception des bâtiments à énergie positive, d'autres aspects à considérer sont suggérés comme par exemple l'énergie grise, les émissions de GES (et plus généralement les impacts environnementaux), et les interactions avec le réseau. Différents indicateurs permettant d'évaluer l'adéquation temporelle entre demande et production énergétiques ont été proposés : certains sont orientés du point de vue du bâtiment (indicateurs de type « *load matching* »), et d'autres par rapport à celui du réseau (indicateurs de type « *grid interaction* »). Pour l'heure, des valeurs de référence, selon le climat et la typologie des bâtiments, restent à définir pour ces indicateurs afin de guider, en pratique, les choix des concepteurs.

1.1.4. Exemples de MEPOS existantes

L'analyse de quelques réalisations exemplaires peut permettre d'identifier les éléments techniques (solutions constructives, équipements) et architecturaux les plus couramment intégrés au concept de maison à énergie positive (MEPOS). Dans ce but, une liste d'un ensemble de bases de données sur les BEPOS est tout d'abord proposée. Dans un second temps, une présentation puis une analyse comparative de cinq bâtiments sélectionnés sont proposées.

1.1.4.1. BASES DE DONNÉES EXISTANTES SUR LE BEPOS

Plusieurs recensements plus ou moins documentés, sous forme de cartographie ou de base de données, existent sur le concept (au sens large) de BEPOS. Parmi les principaux existants figurent :

- celui de l'AIE³⁴ ;
- celui du département américain sur l'énergie³⁵ (DoE pour « *Department of Energy* » ;

³⁴ <http://www.enob.info/en/net-zero-energy-buildings/map/>

- celui de l'observatoire BBC³⁶ ;
- celui de la société Alphééis réalisé pour le compte de l'ADEME³⁷ ;
- celui du Passive House Institute³⁸ ;
- celui de MINERGIE³⁹ ;
- celui du projet COMEPOS⁴⁰.

1.1.4.2. LA MAISON INCAS BÉTON BANCHÉ

La plateforme expérimentale INCAS située au Bourget-du-Lac (CEA 2010) est dédiée au développement d'habitations à énergie positive intégrant plusieurs technologies notamment solaires. Une des maisons de cette plateforme est la maison « I-BB » (béton banché), réalisée par l'entreprise Maisons Giraud (Figure 1-8). Dans le but d'étudier la fiabilité des outils de simulation, elle est inhabitée pour s'affranchir des incertitudes liées aux occupants. Possédant deux niveaux pour une surface habitable de 89 m², le niveau de performance est proche de celle du standard allemand « *Passive House* ». L'architecture est simple et compacte, optimisant les apports solaires (façade sud fortement vitrée avec protections solaires, panneaux photovoltaïques en toiture et thermiques sur le garde-corps du balcon). Toutes les fenêtres sont à double vitrage basse émissivité excepté celles au Nord qui ont un triple vitrage. Érigée sur vide sanitaire, la maison dispose de combles perdus sous la toiture et est isolée par l'extérieur par 20 cm de polystyrène extrudé (en paroi verticale et plancher bas) et 20 cm de laine de verre (plancher haut). Le chauffage se fait par air soufflé et utilise le réseau de distribution d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC) double-flux disposant d'un échangeur thermique pour récupérer la chaleur de l'air vicié.

³⁵ <http://energy.gov/eere/buildings/doe-tour-zero>

³⁶ <http://www.observatoirebbc.org/site/bepos/>

³⁷ http://www.ewatchservices.com/accueil_bepos.html

³⁸ <http://www.passivhausprojekte.de/#k>

³⁹ <https://www.MINERGIE.ch/liste-des-batiments.html>

⁴⁰ <http://www.comepos.fr/index.php/demonstrateurs>



Figure 1-8. Maison I-BB de plateforme INCAS à Chambéry, source : www.cea.fr

Dans le but d'évaluer ce que pourrait être le bilan énergétique de cette maison en configuration « tout électrique » si elle était habitée, un scénario d'occupation a été défini (4 personnes, chauffage à 19 °C, apports internes correspondant à 2680 kWh sur l'année). Les détails de cette étude figurent en Annexe B. Les résultats des simulations montrent qu'un bilan équilibré sur l'année semble possible. L'ensemble des consommations est de l'ordre de 6 700 kWh et la production totale d'énergie (solaire thermique et photovoltaïque) s'élève à environ 6 800 kWh.

1.1.4.3. LA MAISON HÖLKEN

Cette maison solaire autonome expérimentale a été construite à Fribourg-en-Brisgau (Allemagne) en 1992 par le *Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme* (F-ISE) (Voss et al. 1996). D'une surface chauffée de 145 m², cette maison a été conçue selon une approche bioclimatique avec une façade solaire composée de vitrages (coefficient de déperditions égal à 0,6 W.m⁻².K⁻¹), d'isolants opaques (coefficient de déperditions inférieur à 0,2 W.m⁻².K⁻¹) et d'isolants transparents associés à des protections solaires intégrées (Figure 1-9). Un échangeur de chaleur sur air vicié associé à un échangeur air-sol permet de minimiser les besoins de chauffage, tandis que les appareils électriques retenus sont particulièrement efficaces. Des panneaux photovoltaïques (34 m²) assurent la génération de l'électricité et des capteurs solaires thermiques (12 m²) celle de l'ECS. La gestion et le stockage de l'énergie de la maison sont assurés par une pile à combustible réversible fonctionnant en cogénération : le surplus d'électricité produit par les panneaux photovoltaïques en été sert à l'électrolyse de l'eau. Lors de pointes de besoins et en l'absence de soleil, la pile convertit l'hydrogène stocké en électricité et en chaleur (Goetzberger et al. 1993).

Le suivi des consommations sur plusieurs années indique que la part du chauffage de cette maison est quasiment nulle, et que l'eau chaude sanitaire et

l'électricité spécifique représentent la majeure partie de la consommation du bâtiment. Selon Goetzberger et al. (1994), la généralisation à grande échelle d'un tel bâtiment se heurte à des contraintes techniques, économiques, et environnementales, même si l'autonomie énergétique est atteinte.



Figure 1-9. Façade sud de la maison Hölken d'après Fraunhofer-ISE (1992)

1.1.4.4. LA MAISON ZEN

La maison ZEN (« Zero Energy Net »), située à Montagnole (Savoie, France), est utilisée depuis début 2008 par son concepteur, Alain Ricaud, et son entreprise (Ricaud et Lokhat 2012). D'une surface de 200 m², cette maison de structure en bois massif (Figure 1-10) a pour but d'atteindre le bilan d'énergie positif, l'absence d'émission de CO₂ et la reproductibilité. Conçue selon les principes du bioclimatisme, elle est isolée par une couche de liège expansée et est composée de larges fenêtres à triple vitrage peu émissif avec lame argon et de protections solaires. Le chauffage ou le rafraîchissement par l'air de ventilation est assuré par une pompe à chaleur sur air extrait couplée à un échangeur air-sol. Une pompe à chaleur air-eau produit, quant à elle, l'eau chaude sanitaire et un complément de chauffage par les murs. L'ensemble de l'énergie consommée correspond à de l'électricité, compensée par une toiture photovoltaïque de 13,5 kW_c. En matière de bilan, la production photovoltaïque prévisionnelle (12 000 kWh) couvre en théorie largement la totalité des consommations, estimée à 9 000 kWh environ.



Figure 1-10. La maison ZEN, tirée de (Ricaud et Lokhat 2012)

1.1.4.5. LE LOTISSEMENT SOLARSIEDLUNG

L'architecte allemand Rolf Disch a conçu plusieurs projets selon le concept *Plusenergiehaus* (bâtiment à énergie positive). C'est le cas notamment du lotissement solaire *Solarsiedlung* de Fribourgen-Brigau (Figure 1-11), dont le projet a démarré en 1997 et la construction s'est achevée milieu des années 2000. Les 58 maisons à ossature bois offrent des surfaces habitables comprises entre 75 m² à 270 m² et présentent des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh.m⁻².a⁻¹. Chaque maison est équipée d'une toiture photovoltaïque (PV) d'une puissance crête de 3 à 10 kWc. La production électrique est injectée sur le réseau public (Disch 2008). Un monitoring a été effectué sur 20 logements (Heinze et Voss 2009) et les résultats montrent un bilan d'énergie primaire en moyenne très positif (+36 kWh.m⁻².a⁻¹). En énergie finale, les postes du chauffage et de l'ECS représentent 25 kWh.m⁻².a⁻¹, la consommation d'électricité spécifique 21 kWh.m⁻².a⁻¹ et la production photovoltaïque 43 kWh.m⁻².a⁻¹ ce qui explique le bilan en énergie primaire positif. Plusieurs mesures ont contribué à atteindre ce résultat :

- isolation thermique importante (coefficient global de déperditions du bâtiment égal à 0,28 W.m⁻².K⁻¹) ;
- ventilation mécanique double flux avec récupération de chaleur à haute efficacité ;
- électroménager à très faible consommation et utilisation appropriée par les occupants ;
- présence d'un réseau de chaleur produite par un système de cogénération à bois et gaz naturel.

Il est remarquable de constater que même si le bilan moyen est largement positif pour les 20 logements, il existe quelques logements qui n'arrivent pas à atteindre

la condition de « *zéro énergie* », notamment ceux avec un ratio défavorable entre surface de PV et surface habitable (immeubles à trois étages) et ceux situés à l'extrémité d'un immeuble (surfaces déperditives plus importantes). Le nombre d'occupants par logement peut aussi être un des facteurs explicatifs.



Figure 1-11. Aperçu du lotissement Solarsiedlung de Rold Disch, source : www.rolfdisch.de

1.1.4.6. LA MAISON CHLOÉ

❖ Description générale

La maison Chloé est la première maison de France certifiée « *Passive House Plus* » (La Maison Passive 2016). Érigée au cœur de l'Alsace en 2011, elle a d'abord obtenu la certification « *Passive House Classic* » en 2012 (Doaré 2012), avant que les maîtres d'ouvrage décident en 2016 de faire évoluer cette maison passive vers une maison à énergie positive (Figure 1-12). La maison Chloé offre une surface habitable de 114 m² avec un rez-de-chaussée disposant de grandes baies vitrées (protégées par des volets coulissants et des brise-soleil), un étage composé de trois chambres (dont deux ont été réaménagés pour accueillir les bureaux des sociétés Maisons Voegelé et B. Conception), d'une salle de bains et de toilettes (Figure 1-13).



Figure 1-12. Façades « Sud » de la maison Chloé originale (gauche), et extension (droite) de la surface de panneaux photovoltaïques pour obtenir la certification « Passive House Plus », tirée de La Maison Passive (2016)

❖ Enveloppe

La maison présente une architecture très compacte et une isolation renforcée de près de 49 cm en paroi, pour une résistance thermique supérieure à $11 \text{ m}^2/\text{K}/\text{W}$. La structure en ossature bois préfabriquée liée à une dalle en béton ceinturée par de l'isolant permet un traitement efficace des ponts thermiques de l'enveloppe. Toutes les menuiseries sont en alu/bois et en triple-vitrage avec un facteur solaire élevé, 60 %, et un coefficient de déperditions thermiques très bas ($U_W = 0,72 \text{ W}/\text{K}/\text{m}^2$). L'étanchéité à l'air présente une performance très élevée, avec un résultat de mesure de 0,39 vol/h sous 50 pascals lors du test final. Une démarche environnementale a été mise en œuvre via l'utilisation de matériaux bio-sourcés comme le bois en ossature et des isolants à base végétale (ouate de cellulose et fibre de bois), ou encore l'usage de peintures « éco-labellisées ». Un écran antimagnétique a par ailleurs été ajouté dans les murs du fait de la proximité de la maison avec une ligne à haute tension (400 000V).

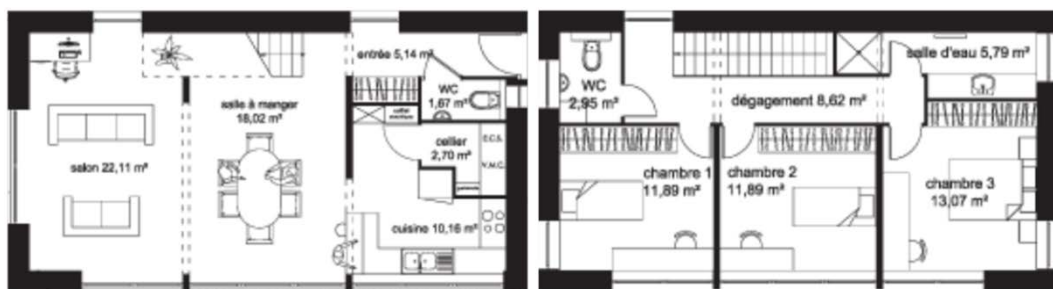


Figure 1-13. Plan du rez-de-chaussée (à gauche) et de l'étage (à droite) de la maison Chloé

❖ Systèmes

Les eaux pluviales sont récupérées dans une cuve (de 2 700 litres) qui alimente les toilettes et le lave-linge, et un récupérateur de chaleur sur eaux

grises est installé sur la douche, permettant de préchauffer l'ECS. La maison dispose d'une ventilation double-flux (rendement de l'échangeur : 75 % certifié par le PHI) multi-fonctions puisqu'elle associe les fonctions de chauffage, et de chauffe-eau thermodynamique via une mini pompe à chaleur. Elle est de plus reliée à un puits canadien glycolé, s'affranchissant ainsi de système hors-gel. L'éclairage est intégralement équipé de diodes électro-luminescentes (LED). Initialement, 10 m² de panneaux photovoltaïques avaient été installés en toiture (produisant environ 1 100 kWh/an), couvrant de l'ordre de 15 % de la consommation totale en énergie finale annuelle mesurée (autour de 6 200 kWh), dont l'ECS est le contributeur majeur, de manière nette. Depuis, la capacité photovoltaïque a été augmentée à 6 kWc (soit un peu plus de 60 m² de panneaux), pour une production à présent supérieure aux consommations (7 000 kWh générés environ). Cet investissement ultérieur à la construction de 2012 a été rendu possible grâce à une progression de la filière photovoltaïque en matière de coût et de performances des capteurs.

❖ Mesures

Un ensemble de capteurs permet de suivre en temps réel, via un logiciel, le taux de CO₂ et de radon, l'hygrométrie, les températures intérieure et extérieure, les consommations d'ECS, de chauffage, et de ventilation entre autres. Cette instrumentation a nécessité un surcoût relativement modéré, de l'ordre de 2 500 €.

1.1.4.7. ANALYSE COMPARATIVE

L'analyse de plusieurs des caractéristiques principales de ces quelques projets (Tableau 1-2) permet, de manière qualitative, d'émettre différentes remarques.

Pour chacun de ces projets, l'approche a été différente. La maison expérimentale INCAS développe notamment des solutions technologiques solaires. La maison autonome Hölken a fortement développé les aspects de chauffage passif et de stockage de l'énergie. La maison ZEN est un bâtiment à énergie positive qui dépasse largement les exigences du standard « *Passive House* ». Les maisons « *Plusenergiehaus* » correspondent davantage aux contraintes de coût liées au marché. Et enfin, la maison Chloé vise l'exemplarité.

Toutefois, les techniques mises en œuvre sur ces projets présentent certaines similitudes. La réduction des besoins de chaleur et la nécessité, pour cela, de maîtriser la plus grande partie des échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur a amené invariablement à disposer les ouvertures du bâtiment de manière optimale, à mettre en place des protections solaires, à surisoler les parois, à utiliser des vitrages très isolants, à réduire les ponts thermiques, à réduire

les infiltrations d'air, à traiter la ventilation de manière mécanisée et à recycler la plus grande partie de la chaleur à l'aide d'un échangeur sur air vicié.

En revanche, selon l'objectif retenu, le choix des systèmes de production, de transformation, de stockage, de diffusion et de consommation de l'énergie varie fortement. En particulier, pour les maisons Hölken et ZEN, le refus de consommer des carburants fossiles localement ou à distance (pas de consommation nette d'électricité à partir du réseau électrique) a mené au choix du tout électrique au niveau local.

En ce qui concerne l'état de l'art des bâtiments à énergie positive à l'échelle mondiale, (Musall et al. 2010) ont proposé une liste de 280 bâtiments à zéro énergie en 2010, déjà construits ou en cours de construction, dont 25 % en Allemagne et 25 % entre Canada et États-Unis ; les autres pays avec une contribution importante sont l'Autriche, la France (18 bâtiments) et la Suisse. Dans environ un tiers de ces bâtiments, la consommation énergétique est réduite d'au moins 60 % par rapport au niveau de performance imposé par la réglementation thermique nationale, ce qui conduit à une isolation thermique importante, une bonne compacité et l'exploitation optimale des gains solaires. L'enveloppe n'est plus seulement utilisée pour protéger l'espace intérieur du climat extérieur, mais elle devient multifonctionnelle car elle intègre plusieurs fonctions : éclairage, gestion des apports solaires, ventilation naturelle. En conséquence, un investissement économique notable est orienté vers l'enveloppe. Les principales techniques utilisées dans ces projets pour promouvoir la réduction des besoins énergétiques, tout en gardant un niveau de confort thermique approprié pour les occupants, sont :

- les systèmes de ventilation mécanique contrôlée, généralement double-flux avec récupération de chaleur ;
- la surventilation naturelle nocturne en période chaude ;
- les protections solaires optimisées pour garder un bon niveau d'éclairage naturel ;
- les capteurs solaires thermiques pour la production d'eau chaude sanitaire ;
- les systèmes de climatisation à faible consommation avec logique de contrôle optimisée (notamment, pompes et ventilateurs à vitesse variable) ;
- le système d'éclairage artificiel équipé de capteurs de présence et dimensionné pour donner un faible éclairage de base (100 lux) avec des valeurs plus importantes (300 lux) sur le plan de travail par le biais de lampes à très haute efficacité (LED).

L'installation de panneaux photovoltaïques pour la production *in situ* d'énergie électrique est une solution quasiment incontournable : dans 95 % des bâtiments résidentiels à zéro énergie recensés, des panneaux PV en toiture sont choisis ; dans 20 % des cas il y en a également en façade. Ce choix a de fortes implications sur la conception du bâtiment au niveau architectural, à cause de l'impact esthétique des panneaux et de l'importance de l'orientation et de la position du bâtiment par rapport aux environs (absence d'ombre sur les panneaux) sur la performance du système photovoltaïque. Les systèmes de gestion et contrôle des installations thermiques sont programmés de façon à donner la priorité aux systèmes alimentés par une source d'énergie renouvelable par rapport à ceux qui utilisent de l'énergie fossile.

Les systèmes solaires thermiques sont utilisés dans 60 % des bâtiments recensés afin de réduire les besoins énergétique et non pas pour générer un bilan positif, car l'énergie thermique est distribuée par le biais de réseaux sur site ; pour cette raison l'impact de ces systèmes est moindre que celui des panneaux PV et leur intégration est plus facile. Dans les grands complexes résidentiels et dans les bâtiments tertiaires les capteurs solaires sont parfois remplacés par des systèmes de cogénération (30 % des bâtiments en moyenne).

Il est également intéressant de remarquer que dans une grande partie des bâtiments recensés la contribution la plus importante à la consommation d'énergie primaire – c'est-à-dire 60-70 % – provient des équipements électriques (bureautique, électroménager), tant dans les logements que dans les bâtiments tertiaires.

Ces conclusions sont globalement en phase avec celles sur l'analyse qualitative des cinq maisons réalisée. Ces points remarquables qui émergent de l'état de l'art permettront d'alimenter et adapter le processus de conception de maisons à énergie positive.

Tableau 1-2. Principales caractéristiques des maisons recensées

	Maison INCAS	Maison Hölken	Maison ZEN	Maisons « Plusenergie-haus »	Maison Chloé
Enveloppe	Isolation renforcée	Oui	Oui	Oui	Oui
	Étanchéité à l'air (n_{50})	0,26	NC	NC	0,39
	Protection(s) solaire(s)	Oui	Oui	Oui	Oui
Équipements	Rafraîchissement	Passif	Passif et actif	Passif	Passif
	Équipements économes	Oui	Oui	Oui	Oui
	Échangeur sur air vicié	Oui	Oui	Oui	Oui
	Réseau de chauffage	À air	À air, complément à eau	À air	À air
	Préchauffage de l'air ventilé	Non	Échangeur air/sol	Non	Échangeur air/sol
Systèmes	Résistance électrique	Non	Pile à combustible réversible en cogénération	Cogénération bois et gaz naturel	Pompe à chaleur + récup. de chaleur sur eaux grises
	Sources d'énergie	Solaire PV et thermique	Solaire PV et thermique	Solaire PV	Solaire PV
Bilan	Consommation totale (kWh/m ² /an)	Environ 60 (éclairage inclus)	Environ 30	NC (- 36 en bilan)	Environ 55
	Taux de couverture annuel par une production ENR	Proche de 100 %	100 %	Supérieur à 100 %	Supérieur à 100 %

1.1.5. Conclusion

Cette section a permis d'apprécier la diversité des définitions existantes sur le concept de « bâtiment à énergie positive ». Pour améliorer sa visibilité, un cadre méthodologique commun de définitions a été construit, permettant une lecture uniformisée et cohérente de cette pluralité de définitions, en partie nécessaire compte tenu du contexte énergétique, économique, et politique) propre et unique à chaque pays. L'examen de plusieurs ouvrages exemplaires a permis d'esquisser les principales caractéristiques et solutions techniques adaptées à ce concept, que plusieurs initiatives internationales ou nationales (Annexe A) visent à développer et généraliser pour faciliter sa pénétration sur le marché. Néanmoins, pour s'inscrire comme de réelles solutions de développement durable, ces bâtiments devront dépasser le cadre énergétique et être écoconçus pour également intégrer les impacts environnementaux qui leur sont associés.

1.2. ÉCOCONCEPTION DE MAISONS À ÉNERGIE POSITIVE

Mener une opération « à énergie positive » constitue un véritable défi pour la filière du bâtiment, connue pour son inertie, et qui, en l'espace d'un demi-siècle à peine, va progressivement remplacer les logements non isolés d'avant 1973 par des lieux d'habitation « générateurs d'énergie ». Cela inclura entre autres la formation des entreprises de construction à de nouvelles techniques, l'évolution des produits de l'industrie, l'adaptation des outils d'aide à la conception, et la sensibilisation des décideurs comme des occupants à l'utilisation de ces bâtiments novateurs. L'un de ces challenges se situe en conception, phase amont essentielle d'un projet, conditionnant pour beaucoup le succès final d'une opération de construction, et délimitant le périmètre des présents travaux de thèse.

Dans ce but, cette partie vise tout d'abord à rappeler le processus de conception actuel, puis à décrire les problématiques associées à la conception de cette typologie de bâtiments, et enfin à présenter une démarche d'écoconception qui pourra être appliquée pour l'aide à la conception de maisons à énergie positive.

1.2.1. Processus de conception d'un bâtiment

1.2.1.1. PLACE ET IMPORTANCE DE LA PHASE DE CONCEPTION DANS UNE OPÉRATION DE CONSTRUCTION

Une opération classique de construction d'un bâtiment peut généralement se décomposer en cinq phases principales :

1. **Montage** : phase où sont réalisées l'initialisation de la conduite d'opération et les études d'opportunité et de pré faisabilité en vue de recenser les objectifs du projet et d'évaluer les impacts de choix fondamentaux.
2. **Programme** : phase où les besoins de la maîtrise d'ouvrage sont exprimés dans un cahier des charges. Les exigences d'usage, d'exploitation et de maintenance sont explicitées, et la maîtrise d'œuvre estime les coûts et prépare un budget prévisionnel via des missions d'études de faisabilité, de pré-programme et de programme.
3. **Conception**⁴¹ : phase où sont réalisées chronologiquement les missions du maître d'œuvre et des autres acteurs (contrôleur, coordinateur, organisateur), les études techniques d'esquisse (ESQ), les études d'avant-projet sommaire (APS) et détaillé (APD), le dossier de demande de permis de construire (DPC), les études de projet (PRO), la rédaction des dossiers de consultation des entreprises (DCE) et la sélection de ces dernières.
4. **Réalisation** : phase qui correspond aux études de réalisation, à la direction de l'exécution des travaux (DET), à l'ordonnancement, la coordination et le pilotage du chantier (OPC) et aux mises au point menées par les entreprises de construction.
5. **Réception et mise en service** : phase où sont réalisées les opérations préalables à la réception, la réception elle-même, la mise en place de la maintenance et la mise en service des équipements.

La conduite d'une opération se confronte au paradoxe que plus la connaissance du projet s'affine, plus la capacité d'agir encore sur le projet se réduit. Autrement dit, l'incertitude sur l'état final d'un projet diminue au fil de l'avancée de l'opération (Figure 1-14), et ce, avec une certaine non-réversibilité des décisions. De ce fait, la phase de conception est une étape décisive d'une opération puisque les dépenses avérées restent faibles mais les coûts futurs engagés sont déjà élevés, justifiant l'intérêt d'un processus de conception intégré dont l'objectif est de transférer l'essentiel des efforts traditionnels de conception

⁴¹ Les acronymes énoncés sont relatifs aux marchés publics (<http://www.marche-public.fr/Marches-publics/Definitions/Marches-publics-Sigles.htm>) mais leur utilisation est aussi fréquente dans le privé

à des stades plus amont du processus, de manière à réduire les coûts (Figure 1-15).

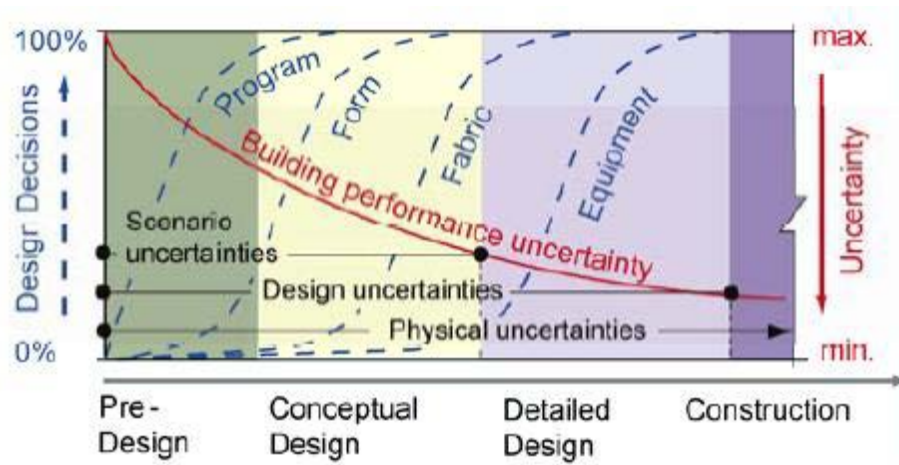


Figure 1-14. Processus de décision classique lors de la conception d'un bâtiment, d'après Torcellini et Ellis (2006)

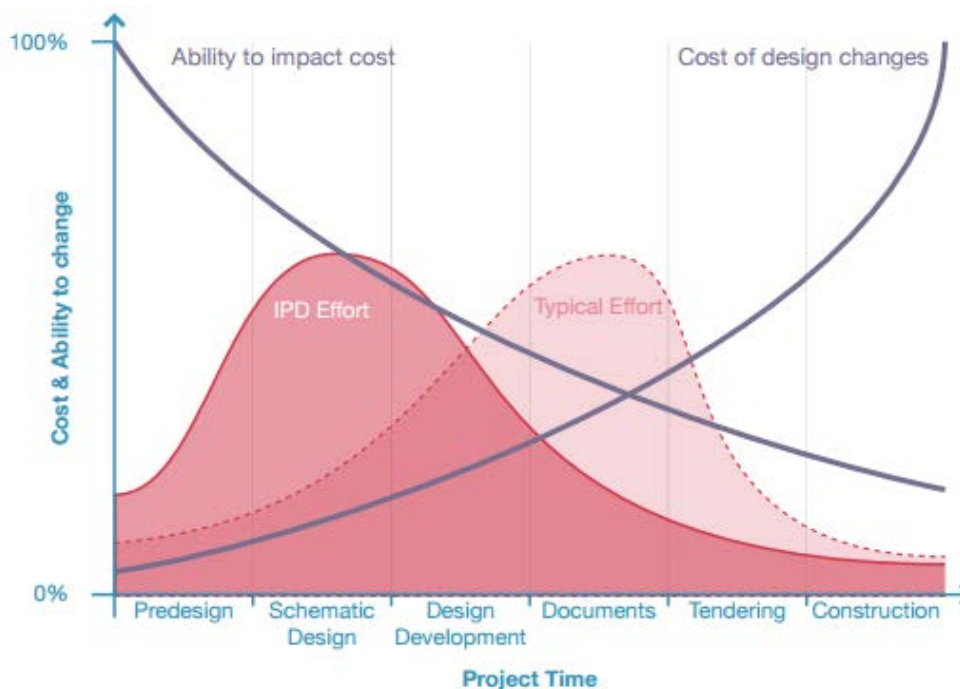


Figure 1-15. Illustration des courbes de Paulson et de MacLeamy montrant l'intérêt de la phase de conception, et d'un processus de conception intégré (IPD pour « Integrated Process Design » en anglais), tirée de Davis (2013)

1.2.1.2. PRATIQUE ACTUELLE EN CONCEPTION

L'industrie du bâtiment présente des particularités qui modèlent de manière singulière son processus de conception. Contrairement au secteur automobile

par exemple, les prototypes sont généralement rares. La plupart du temps, les projets de bâtiment sont uniques, et nécessitent une adaptation forte du processus de conception aux spécificités du projet (caractéristiques du site, contraintes urbanistiques (PLU⁴²), solutions d'approvisionnement énergétique, etc.). Il convient toutefois de distinguer le cas des pavillonneurs (champ de travail de cette thèse), raisonnant par gamme ou série de maisons dans leur démarche de conception, et non par projet de maison. De plus, la durée de vie des bâtiments est grande vis-à-vis de la plupart des autres produits de l'industrie. Les choix du concepteur auront des répercussions sur plusieurs décennies illustrant à nouveau l'étape-clé que représente la phase de conception.

Après de nombreux siècles de construction basée sur une architecture vernaculaire guidée par le bon sens et les connaissances accumulées par l'expérience, le processus de conception a évolué à partir des années 1980 avec la démocratisation de l'informatique, et en particulier en se dotant d'outils de simulation énergétique. De nos jours, leur utilisation est systématique par les bureaux d'études grâce notamment à la disponibilité d'interfaces conviviales. D'après Attia et al. (2013a), le nombre d'outils recensés par le département américain de l'énergie⁴³ (DOE) a quasiment quadruplé entre 1997 (107) et 2011 (404), illustrant cette évolution des pratiques.

L'approche contemporaine consiste à simuler un cas de référence puis à améliorer ses performances initiales en testant, par itérations successives, différentes variantes. En pratique, un seul paramètre à la fois est modifié ce qui permet au concepteur d'appréhender son influence (via le niveau de performance obtenu) pour ensuite évaluer et proposer de meilleures variantes, optimisant alors les performances du projet. Généralement, les outils de simulation thermique des bâtiments sont ainsi utilisés pour assister une démarche procédant par essai et erreur. Ellis et al. (2006) soulignent que cette recherche empirique, guidée par des options « et si... » du concepteur, est inefficace et que l'évolution de la puissance de calcul des ordinateurs engendre une modification des pratiques existantes. Désormais, ce n'est plus le temps de simulation qui est le facteur limitant, mais c'est le temps humain nécessaire pour appréhender les relations entre les entrées et les sorties d'un modèle, et les interactions complexes entre les entrées elles-mêmes.

Face au contexte inédit que pose l'arrivée des bâtiments à énergie positive, les limites du processus de conception actuel se révèlent et invitent à questionner le paradigme en place.

⁴² PLU : Plan Local d'Urbanisme

⁴³ <http://www.buildingenergysoftwaretools.com/home>

1.2.2. Nouvelles problématiques posées en conception

Les enjeux pour concevoir cette typologie de bâtiments sont multiples. Ils s'inscrivent avant tout dans un contexte économique difficile où des niveaux performantiels de plus en plus élevés sont à atteindre. Une réelle logique d'optimisation est ainsi à satisfaire pour concevoir les BEPOS à des coûts maîtrisés pour le marché, ce qui rendra possible leur généralisation. L'article 4 de la directive européenne 2010/31/UE invite dans ce sens « *Les États membres [à prendre] les mesures nécessaires pour garantir que des exigences minimales en matière de performance énergétique des bâtiments ou des unités de bâtiment soient fixées en vue de parvenir à des niveaux optimaux en fonction des coûts* ». Entre nouveaux produits de construction, systèmes innovants et techniques de gestion sans cesse plus sophistiquées, une pléthore de concepts possibles de bâtiments existe, rendant impraticable leur évaluation exhaustive (les temps de calcul seraient exorbitants). Il y a ainsi nécessité de trouver des techniques d'exploration intelligentes et efficaces Machairas et al. (2014) pour permettre d'identifier les meilleurs concepts, c'est-à-dire généralement les concepts les plus performants à moindre coût.

De plus, cette performance à évaluer et à optimiser est résolument multicritère, puisqu'elle vise à conjointement considérer des aspects énergétiques, environnementaux et économiques entre autres. Comme précédemment introduit, l'intégration en conception de la dimension environnementale (dans une optique de développement durable et de préservation de l'environnement) va nécessiter la pratique d'une écoconception pour évaluer les impacts environnementaux engendrés tout au long du cycle de vie des bâtiments. Les objectifs de conception pouvant être antagonistes (p. ex. augmenter l'épaisseur d'isolation diminue les besoins de chauffage mais augmente le coût de construction et les impacts de la fabrication de l'isolant), tout l'enjeu consiste à trouver les compromis les plus intéressants. Il conviendra par ailleurs de prendre en compte les interactions entre les paramètres de décision afin de mettre en évidence les différents leviers de performance qu'il faudra activer et les niveaux auxquels il faudra accéder.

En outre, de par leur haute performance énergétique, les BEPOS sont aussi davantage sensibles aux sollicitations internes ou externes que leurs homologues traditionnels. Il s'agit donc de considérer avec attention les interactions entre ces bâtiments, leurs environnements, et leurs occupants (Andersen 2012). Étant générateurs d'énergie, et majoritairement connectés au réseau électrique, la problématique des échanges de ces bâtiments avec le réseau constitue un sujet à traiter, principalement d'un point de vue macroscopique et des gestionnaires de réseau. Différentes échelles temporelles sont ainsi à conjointement considérer,

de l'horaire à l'infra-horaire pour les échanges avec le réseau, à la décennie pour une approche sur tout le cycle de vie, en passant par l'année pour des bilans intégrant les saisonnalités.

Enfin, face à des hypothèses de modélisation perfectibles (scénarios d'occupation déterministes par exemple) et un futur incertain (réchauffement climatique, évolution du prix de l'énergie...), il convient d'étudier de la meilleure façon possible la robustesse des concepts trouvés, de manière à intégrer les risques associés à chaque concept lors du processus de décision, et à ne pas uniquement se baser sur les performances évaluées de façon déterministe, à l'instant présent, et sous des conditions de modélisation incertaines.

Des exemples de questions concrètes peuvent être donnés pour illustrer les verrous identifiés :

- Jusqu'où faut-il pousser l'amélioration de la performance de l'enveloppe (par exemple réduction de x % des « besoins bioclimatiques », amélioration de l'étanchéité, réduction des ponts thermiques) pour optimiser le bilan global intégrant les équipements et la production renouvelable ?
- Sur quel(s) critère(s) cette optimisation doit-elle se faire (énergie primaire sur le cycle de vie, CO₂, coût...) et comment appréhender l'aspect multicritère de la performance ?
- Une maison bien conçue pour des personnes en activité (scénario réglementaire considérant un chauffage réduit durant la journée) reste-t-elle performante pour des retraités (chauffage en continu) ?
- Pour optimiser un système plus global incluant les interactions avec les réseaux, vaut-il mieux privilégier l'autoproduction (produire localement l'électricité consommée dans la maison pour éviter d'importer depuis le réseau aux heures de pointe), l'autoconsommation (éviter de surcharger le réseau par une production importante à certains moments), existe-t-il des méthodes permettant une optimisation globale sur l'année ?

Pour répondre à ces questions, des techniques d'optimisation intégrant une approche multicritère de la performance semblent être particulièrement bien adaptées. Elles sont présentées au paragraphe 1.3.2.2. Au préalable, la démarche d'écoconception, constituant l'un des éléments nécessaires pour répondre aux problématiques exposées, est présentée dans la section 1.2.3.

1.2.3. Démarche d'écoconception

1.2.3.1. DÉFINITIONS ET PRINCIPES DE BASE

Il existe de nombreuses définitions de l'écoconception, qui ont par ailleurs évolué avec le temps et les retours d'expérience. Le réseau européen ENEC (*European Network of Ecodesign Centres*) a par exemple analysé, avec un regard international, 34 définitions issues à la fois de la littérature et de propositions de partenaires (Prendeville et al. 2014).

La norme ISO 14006⁴⁴, relative aux systèmes de management environnemental et aux lignes directrices pour intégrer l'écoconception, définit cette approche comme « l'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit avec pour objectif la réduction des impacts environnementaux négatifs tout au long du cycle de vie d'un produit ».

L'association française de normalisation (AFNOR) propose, dans la norme NF X30-264 « Management environnemental – Aide à la mise en place d'une démarche d'écoconception »⁴⁵, une définition plus détaillée en considérant l'écoconception comme « l'intégration systématique des aspects environnementaux dès la conception et le développement de produits (biens et services, systèmes) avec pour objectif la réduction des impacts environnementaux négatifs tout au long de leur cycle de vie à service rendu équivalent ou supérieur. Cette approche dès l'amont d'un processus de conception vise à trouver le meilleur équilibre entre les exigences environnementales, sociales, techniques et économiques dans la conception et le développement de produits ». Dans le domaine du bâtiment, elle peut synthétiquement être vue comme une approche consistant à intégrer l'environnement lors de la conception d'un ouvrage, avec une vision sur l'ensemble de son cycle de vie (Peuportier et al. 2013).

Cette approche est résolument préventive des problèmes environnementaux liés à l'eau, l'air, le sol, le bruit, les matières premières, les déchets, l'énergie... Le but premier de la démarche est de réduire de manière qualitative ou quantitative les impacts du produit ou du service considéré. Pour ce faire, elle vise tout d'abord à évaluer les principaux impacts de ce dernier (via différentes méthodologies et divers outils) puis à minimiser ces impacts par la mise en place de différentes mesures (changement de matériaux, meilleure efficacité énergétique, facilité de recyclage des produits en fin de vie...). L'écoconception peut ainsi conduire à des économies significatives en limitant par exemple le coût

⁴⁴ <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14006:ed-1:v1:fr>

⁴⁵ <http://www.boutique.afnor.org/norme/nf-x30-264/management-environnemental-aide-a-la-mise-en-place-d-une-demarche-d-eco-conception/article/803060/fa166440>

des transports ou en diminuant le recours à des matières premières via l'utilisation de matériaux recyclés.

L'un des principes fondamentaux de l'écoconception consiste à éviter le transfert de pollution, c'est-à-dire le déplacement d'impacts environnementaux hors du champ d'étude, et notamment par :

- Le **transfert de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre**. En raisonnant uniquement sur l'étape d'exploitation d'un bâtiment, les impacts des autres étapes (construction, rénovation et démolition) sont omis. Il y a ainsi un risque de considérer des bénéfices obtenus en exploitation, sans intégrer les compensations négatives correspondant à d'autres étapes. Par exemple, une isolation renforcée permettra de diminuer la consommation d'énergie lors de l'étape d'utilisation, mais augmentera l'énergie grise mobilisée lors de l'étape de construction. Ce transfert de pollution concerne pleinement les BEPOS, pouvant disposer de nombreux équipements technologiques (panneaux photovoltaïques, pompe à chaleur...) permettant d'améliorer la performance en usage, mais ayant des impacts non négligeables sur les autres étapes, comme les éventuels multiples remplacements de systèmes, ou le recyclage de ces derniers en fin de vie.

Le **transfert de pollution d'un problème environnemental vers un autre**. Par exemple, Peuportier (2014) rappelle que « la problématique de l'épuisement des ressources énergétiques liées à la « crise du pétrole » dans les années 1970 a conduit à sélectionner de nouveaux fluides frigorigènes, mais ceux-ci portent atteinte à la couche d'ozone. Des produits de substitution ont alors été mis en œuvre, mais [cette fois] au détriment du climat. La focalisation actuelle sur le bilan carbone risque de déplacer les problèmes vers des risques sanitaires liés par exemple aux filières nucléaires ou biomasse ».

Pour maîtriser ces transferts de pollution, l'écoconception se pose ainsi comme une approche **multiétape**, considérant l'ensemble des étapes du cycle de vie du produit, et **multicritère**, visant un regard holistique des impacts de ce produit sur l'environnement.

1.2.3.2. L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE : OUTIL PRIVILÉGIÉ POUR L'ÉCOCONCEPTION DE BÂTIMENTS

❖ Pertinence de l'analyse de cycle de vie pour l'écoconception de bâtiments

Parmi les outils d'analyse environnementale existants, l'analyse de cycle de vie (ACV) est particulièrement adaptée pour mettre en œuvre une démarche d'écoconception. Joliet et al. (2010) la comparent à trois autres outils :

1. l'analyse des flux d'une substance (AFS), quantifiant les flux et l'accumulation dans l'environnement d'une substance ;
2. l'étude d'impact environnemental (EIE), visant à évaluer localement l'impact environnemental d'un nouveau projet sur un site précis ;
3. et l'analyse de risque (AR), dont l'objectif est d'estimer une probabilité d'événements rares mais potentiellement dangereux (fuite d'une substance chimiques, indicent dans une centrale nucléaire...).

Contrairement à l'AFS, l'ACV permet d'évaluer l'impact d'un grand nombre de polluants et pour de nombreux effets. Leur point commun est de mener des bilans de masse, essentiels pour établir un inventaire des émissions. Par rapport à l'ACV, l'EIE se situe à une échelle uniquement locale (le quartier, la région, etc.) et ne considère pas tout le cycle de vie de l'objet d'étude, mais plutôt un horizon temporel relativement proche autour de la réalisation de l'étude. Cette approche n'est donc pas appropriée à l'étude d'un bâtiment, où les sources de pollution sont multiples et pas toujours localisables. En effet, lors des phases amont de conception, l'architecte ne connaît en général pas où seront produits les matériaux utilisés par les entreprises, et par quels procédés (Peuportier 2008). En revanche, l'EIE peut être complémentaire à une ACV en étudiant spécifiquement une source de pollution importante du projet (chaufferie de grande taille par exemple). Enfin, l'AR et l'ACV partagent l'évaluation des impacts sur les hommes et les écosystèmes de l'exposition à des substances chimiques émises dans l'air, l'eau, le sol et les aliments. Néanmoins, ces deux méthodes diffèrent dans l'exploitation de cette évaluation. L'ACV a pour objectif de déterminer la contribution potentielle moyenne du système étudié à un ensemble d'impacts environnementaux, tandis que l'AR vise à mettre en relief cette contribution par rapport à des seuils de sûreté, généralement localisés.

Des méthodes dérivées et simplifiées de l'ACV peuvent également être signalées telles que l'évaluation simplifiée et qualitative du cycle de vie (ESQCV). Cette méthode vise l'amélioration d'un produit sans pour autant préconiser une estimation de tous les impacts environnementaux (elle est ainsi dite sélective). Toutefois, l'approche qualitative proposée ne permet pas de comparer plusieurs variantes entre elles, ce qui est l'objectif principal en phase de conception de bâtiments. Le nombre réduit de données environnementales utilisées limite également la vision globale pouvant être esquissée à partir de ce type de méthodes simplifiées.

❖ Principe d'une ACV

L'ACV est une méthode multicritère normalisée permettant d'évaluer les impacts environnementaux (sur les milieux physiques, les ressources naturelles et les êtres vivants) d'un produit ou d'un procédé sur l'ensemble de son cycle de vie, à savoir depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement des

déchets en passant par son utilisation et sa maintenance. Le cycle de vie classique d'un bâtiment peut être illustré par la Figure 1-16. Les impacts sont généralement établis à partir d'un bilan des substances extraites et rejetées depuis et vers l'environnement, décomposé à chaque étape du cycle de vie : la construction, l'exploitation, les éventuelles rénovations et la démolition. Ces flux sont liés à un ou plusieurs impacts environnementaux sous la forme d'indicateurs permettant d'évaluer les différentes contributions du bâtiment et d'identifier des leviers pour réduire ses impacts.

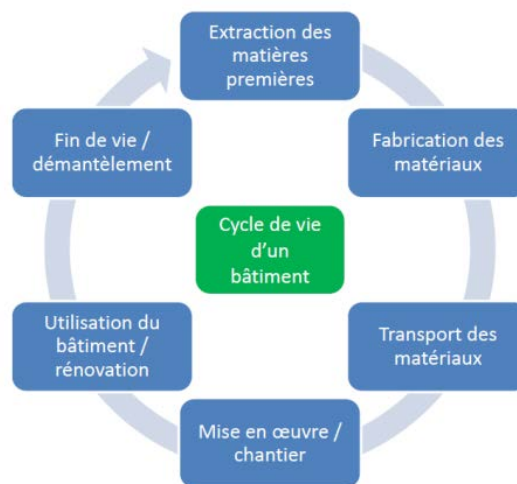


Figure 1-16. Illustration des différentes étapes du cycle de vie d'un bâtiment

❖ Déroulement d'une ACV

Une ACV se déroule en quatre phases, illustrées à la Figure 1-17.

1. **La définition de l'objectif et du champ de l'étude.** Dans cette phase essentielle, le périmètre de l'étude est fixé et le service offert par le système étudié est défini via une unité fonctionnelle, ce qui permettra de comparer plusieurs variantes sur une base commune. L'unité fonctionnelle est caractérisée par une quantité, une fonction, une ou plusieurs qualités associées à cette fonction et une durée. Par exemple, pour une peinture, une unité fonctionnelle pourrait être « couvrir 1 m² d'un mur avec un degré d'opacité donné et pour une durée de 15 ans ».
2. **L'analyse de l'inventaire.** Cette phase consiste à quantifier les différents flux traversant le système précédemment défini, c'est-à-dire à inventorier les substances extraites et émises dans l'environnement sur tout le cycle de vie. Un inventaire de cycle de vie (ICV) est ainsi établi.
3. **L'analyse de l'impact sur l'environnement.** Dans cette phase, les données d'inventaire sont utilisées pour calculer des impacts

potentiels du système sur l'environnement. Ces indicateurs concernent la santé humaine, les écosystèmes et les ressources naturelles.

4. **L'interprétation des résultats.** Cette phase vise à porter un regard critique sur l'étude menée afin d'améliorer sa pertinence. La robustesse des résultats peut être étudiée et certaines hypothèses remises en cause, conduisant, dans une démarche itérative, à affiner progressivement les différentes phases.

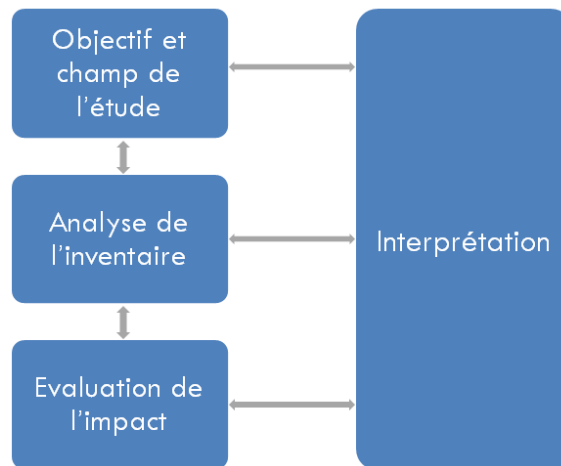


Figure 1-17. Les quatre phases de l'analyse de cycle de vie (ISO 14 040 2006)

❖ Nature des résultats, exigences et limites de l'ACV

Il est tout d'abord à noter que les résultats d'une ACV correspondent à une évaluation moyenne d'impacts potentiels, et ne représentent pas les impacts réels générés. De plus, l'ACV est fondamentalement basée sur une approche multicritère, de par la nature complètement différente des impacts mis en jeu. À l'heure actuelle, il n'y a pas de consensus sur le choix d'une méthode de prise de décision dans ce contexte. Cette problématique constitue un champ de recherche actif. Ensuite, deux exigences majeures peuvent être relevées pour réaliser une ACV : l'exigence de qualité des données et l'exigence d'une revue critique dans le but d'apporter une cohérence et une crédibilité supplémentaires aux résultats. Enfin, l'ACV présente des limites pratiques et conceptuelles. La récolte de données peut en effet être laborieuse, et le choix des hypothèses ou de la méthode d'analyse de l'impact peut également être soumis à une certaine subjectivité de l'auteur de l'étude, et conduire éventuellement à des controverses. La non prise en compte d'aspects qualitatifs comme l'atteinte aux paysages ou le niveau d'incertitude actuellement encore élevé dans l'évaluation de certains indicateurs (p. ex. toxicité humaine) représentent également des limitations à cette méthode (Peuportier 2008). Pour plus de détails, Reap et al. (2008a) et Reap et al. (2008b) répertorient, selon l'étape du cycle de vie, les principaux problèmes rencontrés en ACV.

❖ Impacts environnementaux liés au bâtiment

Les impacts environnementaux liés au bâtiment sont multiples, rendant la sélection d'indicateurs environnementaux complexe. Dans ce contexte, des grilles d'objectifs de développement durable ont été étudiées dans différents projets européens ou nationaux (Peuportier 2014). Pour la dimension environnementale, deux buts principaux ont par exemple été relevés : « préserver les ressources » et « protéger les écosystèmes » (Støa et Nesje 2005). À chacun de ces buts sont associés plusieurs objectifs comme « économiser l'eau » pour le premier, ou « protéger le climat » pour le second. Des indicateurs environnementaux peuvent alors être déclinés pour permettre d'évaluer le degré de réponse d'un projet à ces objectifs environnementaux.

Le Tableau 1-3 liste les douze indicateurs considérés dans l'outil *novaEQUER* (Peuportier 2008), évolution de l'outil *EQUER* (Polster 1995). Contrairement aux dix premiers indicateurs, relevant de la dimension environnementale, les deux derniers indicateurs ont trait à la dimension sociale, avec pour buts respectifs de « préserver la santé des résidents » et « d'améliorer le confort ». La « demande cumulative d'énergie » comptabilise, en énergie primaire, les consommations énergétiques du bâtiment. La « consommation d'eau » représente la somme des volumes d'eau puisée de diverses sources (rivières, nappes phréatiques...) sauf celle de la mer, considérée comme non limitée. L'indicateur « épuisement des ressources abiotiques » estime l'épuisement d'une matière première ou d'un combustible en fonction de sa rareté, et de son taux d'extraction. L'« effet de serre » à cent ans traduit le potentiel de réchauffement climatique dû aux GES. L'outil *novaEQUER* considère un stockage de CO₂ pendant la croissance du bois, lorsqu'il est issu de forêts gérés durablement (labels PEFC⁴⁶ ou FSC⁴⁷ par exemple). L'indicateur « acidification » traduit la contribution de l'émission de composés soufrés aux phénomènes de pluies acides et au dépérissement des forêts. L'indicateur d'« eutrophisation » est lié à la production d'« algues vertes » via un apport excessif d'éléments azotés ou phosphatés, provoquant à terme une chute de la biodiversité par appauvrissement de la teneur en oxygène du milieu (souvent aquatique). Celui sur l'« ozone photochimique » concerne l'ozone en basse atmosphère (troposphère) qui en se décomposant cause des effets sur la santé (maladies respiratoires), notamment en ville. Le « dommage à la biodiversité » prend en compte plusieurs problèmes environnementaux pour estimer, à l'échelle macroscopique, la qualité de la biosphère. Les « déchets » correspondent à la masse de déchets produits sur l'ensemble du cycle de vie, en intégrant leur dangerosité via un système de pondération. L'indicateur « déchets radioactifs » évalue le volume de déchets nucléaires produits, notamment dus à

⁴⁶ <http://pefc.org/>

⁴⁷ <https://ic.fsc.org/en>

l'utilisation d'électricité issue de la fission nucléaire. À l'instar du dommage à la biodiversité, l'indicateur de « dommage à la santé » vise à regrouper différents problèmes environnementaux (changement climatique, radiations ionisantes, etc.) pouvant impacter la santé humaine. Enfin, les « odeurs » correspondent à un indicateur évaluant les nuisances olfactives globales en additionnant les volumes d'air malodorants correspondant à des seuils de concentration où la moitié d'un échantillon représentatif d'une population détecte l'odeur (méthode des volumes critiques). Une synthèse présentant ces indicateurs de manière plus détaillée est consultable dans l'annexe A de la thèse de doctorat de Rivallain (2013), élaborée à partir de Popovici (2005), Peuportier (2008) et Herfray (2011).

Tableau 1-3. Liste des indicateurs considérés dans l'outil novaEQUER

Buts	Indicateurs	Unités	Méthodes
Préserver les ressources	Demande cumulative d'énergie	[MJ]	CED (Frischknecht et al. 2007)
	Consommation d'eau	[m ³ d'eau puisée]	Frischknecht et al. (2007)
	Épuisement des ressources abiotiques	[kg équivalent de Sb]	CML 2001 (Guinée 2002)
Préserver les écosystèmes	Effet de serre	[kg équivalent de CO ₂]	IPCC 2007 (Solomon 2007)
	Acidification	[kg équivalent de SO ₂]	CML 2001 (Guinée 2002)
	Eutrophisation	[kg équivalent de PO ₄ ³]	CML 2001 (Guinée 2002)
	Production d'ozone photochimique	[kg équivalent de C ₂ H ₄]	CML 2001 (Guinée 2002)
	Dommage à la biodiversité	[PDF.m ² .an]* Fraction d'espèces potentiellement disparues	Eco-indicator 99 (Goedkoop et Spriensma 2001)
	Déchets	[tonne équivalent de déchets ultimes]	Frischknecht et al. (2007)
	Déchets radioactifs	[dm ³ de déchets]	Frischknecht et al. (2007)
Préserver la santé des résidents	Dommage à la santé	[DALY]* Années de vie perdues	Eco-indicator 99 (Goedkoop et Spriensma 2001)
Améliorer le confort	Odeurs	[m ³ d'air malodorant équivalent à 1 kg/m ³ d'ammoniac]	CML 2001 (Guinée 2002)

* PDF : « *Potentially Disappeared Fraction* », DALY : « *Disability Adjusted Life Years* »

❖ Outils d'ACV existants

Pour réaliser une ACV, il est possible d'utiliser des outils génériques comme *SimaPro*, mais la description des bâtiments serait alors fastidieuse. Pour faciliter la saisie, des logiciels dédiés au bâtiment existent en France, parmi eux *novaEQUER*, l'évolution d'*EQUER* (Polster 1995), *Cocon* (Floissac 2011), *Elodie* (CSTB 2013) ou encore *e-LICCO* (CYCLEco 2014). Certains outils permettent de mener une ACV à l'échelle du quartier tels que *novaEQUER* ou NEST (Yepez-Salmon 2011). Selon les outils, les méthodologies et les bases de données employées diffèrent, pouvant entraîner des écarts non négligeables dans certains cas. Néanmoins, des résultats de comparaison existent, montrant une bonne reproductibilité des résultats pour huit outils européens dans le projet de recherche PRESCO (Peuportier et al. 2004a), et deux outils français dans le projet ANR BENEFIS (Lebert et al. 2014). Pour ces travaux, notre choix s'est porté sur l'outil *novaEQUER* (partie 1.4).

1.2.4. Conclusion

La phase de conception est une étape clé dans une opération de construction d'un bâtiment, et *a fortiori* dans une opération de bâtiment à énergie positive. Dans un contexte économique difficile, où une logique d'optimisation est attendue pour répondre de la manière la plus efficiente possible à des niveaux performantiels de plus en plus élevés, pouvoir agir significativement sur le projet à des coûts de modification relativement faibles est en effet essentiel pour améliorer le processus de conception des bâtiments. L'impératif de développement durable invite par ailleurs à mettre en œuvre une démarche d'écoconception des bâtiments, approche multiétape et multicritère permettant de prendre en compte la dimension environnementale dès les stades amonts du processus de conception et pour laquelle l'analyse de cycle de vie apparaît comme l'outil le plus adapté. Dans l'optique d'explorer une vaste palette de concepts dans un temps limité, et d'évaluer et optimiser la performance sous une approche multicritère, l'utilisation de techniques d'optimisation multicritère, devenues accessibles avec l'augmentation de la puissance de calculs des ordinateurs, semble avantageuse, et conduit à un nouveau paradigme en conception.

1.3. VERS UNE ÉCOCONCEPTION ASSISTÉE PAR OPTIMISATION MULTICRITÈRE

1.3.1. Introduction

La section précédente a permis de mettre en évidence les limites du processus actuel de conception dans le contexte de l'écoconception de bâtiments à énergie positive, invitant à changer radicalement d'approche. La complexité du problème posé dépasse en effet ce que l'entendement humain peut saisir par une approche traditionnelle, s'appuyant uniquement sur des outils de simulation. Pour Talbourdet (2014), ces outils servent plutôt à évaluer qu'à suggérer des pistes de conception et nécessitent de l'expérience et un nombre important d'itérations dans une démarche d'essai et erreur pour identifier des solutions performantes.

Dans cette optique, le recours à des procédures d'optimisation dans le domaine du bâtiment a débuté à la fin des années 1980 mais a réellement pris son essor depuis le milieu des années 2000 (Attia et al. 2013b) avec un intérêt croissant jusqu'aujourd'hui (Machairas et al. 2014). Les progrès en matière de puissance de calcul, le développement de techniques mathématiques et algorithmiques, et la généralisation d'outils informatiques accessibles à un large public ont rendu possible l'utilisation de ces techniques.

Dans leur étude comparative, Naboni et al. (2013) illustrent l'intérêt de ces approches, basées sur l'exploitation d'un algorithme d'optimisation pour guider l'exploration du champ des possibles. Les auteurs montrent en effet qu'une approche classique, c'est-à-dire une approche empirique et itérative visant à améliorer un projet en procédant « scénario par scénario », ne permet pas d'atteindre des niveaux de performance élevés, et qu'une approche paramétrique, *i.e.* construisant *a priori* et évaluant un ensemble de multiples combinaisons à partir d'options de conception, requiert des ressources calculatoires prohibitives (pouvant néanmoins être levées en exploitant des serveurs de calcul). Au contraire, une approche par optimisation offre la possibilité de trouver des solutions efficaces dans un temps limité, et permet ainsi d'allouer davantage de temps à la prise de décision.

Selon Machairas et al. (2014), une optimisation en conception de bâtiment se compose d'au moins quatre étapes :

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

En reprenant en partie cette décomposition, un état de l'art synthétique sur ce domaine est proposé ci-dessous, basé principalement sur les travaux de revue de Banos et al. (2011); Stevanović (2013); Attia et al. (2013b); Evins (2013); Nguyen et al. (2014) et Machairas et al. (2014).

1.3.2. *État de l'art sur l'optimisation*

1.3.2.1. DÉFINITIONS ET CONCEPTS DE BASE

❖ Définition et cadre général

L'optimisation est le fait de chercher à identifier des solutions minimisant ou maximisant certains objectifs, en respectant un ensemble de contraintes (Barichard 2003). Ces solutions peuvent être soit des fonctions dans le cas de l'optimisation en dimension infinie, comme par exemple des stratégies de gestion énergétique de bâtiments (Robillart 2015), soit des valeurs de variables de fonctions dans le cas de l'optimisation en dimension finie, comme par exemple des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle de bâtiments existants (Rivallain 2013).

Ces travaux de thèse, visant à identifier les valeurs d'attributs de bâtiments permettant de présenter les meilleurs compromis possibles entre plusieurs critères de performance, appartiennent à la classe des problèmes d'optimisation en dimension finie.

❖ Formalisme

Généralement, un problème d'optimisation en dimension finie peut s'écrire sous la forme suivante :

$$(\mathcal{P}): \begin{cases} \min \mathcal{F}(x) \\ \mathcal{G}(x) \leq 0 \\ \mathcal{H}(x) = 0 \\ x \in E \end{cases} \quad (1.5)$$

où :

- E est l'espace de recherche ou l'espace de décision, de dimension d ($d \in \mathbb{Z}^+$).
- $\mathcal{F}: E \mapsto \mathbb{R}^n$ est une fonction de plusieurs variables ($x = (x_1, \dots, x_d)$) de E à valeurs réelles dans $\mathbb{R}^n$. Elle a n composantes ($n \in \mathbb{Z}^+$) et peut s'écrire :

$$\mathcal{F}(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x)) \quad (1.6)$$

Cette fonction (à minimiser) est appelé indifféremment fonction coût, fonction objectif, ou critère.

- $\mathcal{G}: E \mapsto \mathbb{R}^p$ est une fonction de plusieurs variables ($x = (x_1, \dots, x_d)$) de E à valeurs dans $\mathbb{R}^p$. Elle a p composantes ($p \in \mathbb{Z}^+$) et peut s'écrire :

$$\mathcal{G}(x) = (g_1(x), \dots, g_p(x)) \quad (1.7)$$

La fonction $\mathcal{G}$ représente les contraintes en inégalité. La notation $\mathcal{G}(x) \leq 0$ signifie que les inégalités sont considérées composante par composante : $\mathcal{G}(x) \leq 0 \triangleq \forall i = 1, \dots, p \quad g_i(x) \leq 0$.

- $\mathcal{H}: \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^q$ est une fonction de plusieurs variables ($x = (x_1, \dots, x_d)$) de E à valeurs dans $\mathbb{R}^q$. Elle a q composantes ($q \in \mathbb{Z}^+$) et peut s'écrire :

$$\mathcal{H}(x) = (h_1(x), \dots, h_q(x)) \quad (1.8)$$

La fonction $\mathcal{H}$ représente les contraintes en égalité.

Par convention, les problèmes d'optimisation sont formulés de manière à minimiser la fonction $\mathcal{F}$, mais peuvent être convertis, par principe de dualité en optimisation, en un problème de maximisation en multipliant la fonction par -1.

En conception des bâtiments, l'espace de décision peut correspondre au produit de plusieurs ensembles : par exemple, l'ensemble des réels pour une épaisseur d'isolation, l'ensemble des entiers pour un nombre de panneaux photovoltaïques, ou un ensemble symbolique pour désigner différents systèmes de chauffage (bois, gaz, électrique, etc.).

❖ Approches monocritère et multicritère

Lorsque la fonction $\mathcal{F}$ comporte une seule composante, le problème est dit monocritère, et se caractérise généralement par la recherche d'une unique solution. À l'inverse, dès que la fonction $\mathcal{F}$ comporte au moins deux composantes, le problème est dit multicritère, et l'objectif est alors d'identifier un ensemble de solutions efficaces et à décrire le plus largement possible l'ensemble des compromis disponibles dans l'espace de décision.

Un problème multicritère peut être converti en un problème monocritère via l'introduction d'une forme d'information préférentielle entre les critères, permettant de les agréger dans un critère unique. Si historiquement, les méthodes d'optimisation monocritère sont plus anciennes, et ont été de ce fait plus utilisées, le domaine de l'optimisation multicritère connaît un développement important depuis quelques décennies. Plus complexes, les méthodes d'optimisation multicritère présentent effectivement plusieurs avantages en contrepartie : elles évitent l'introduction de présupposés pour agréger les critères, permettant dans le même temps de travailler sur des critères plus intelligibles, et sont mieux adaptées aux contextes multi-décideurs (avec des points conflictuels), fréquemment rencontrés dans le domaine de l'ingénierie par exemple. Dans le domaine du bâtiment, la tendance commune observée par Evins (2013) et Attia et al. (2013b) est de privilégier les approches multicritères.

❖ Relation de dominance au sens de Pareto

Les solutions admissibles d'un problème d'optimisation (c'est-à-dire les solutions appartenant à l'espace de décision et respectant les contraintes) sont comparées entre elles via une relation d'ordre, pouvant être d'ordre total ou partiel. Rivallain (2013) donne pour exemples l'inégalité sur l'ensemble des réels dans un problème monocritère (ordre total) et les relations de dominance dans un problème multicritère (ordre partiel).

La plus célèbre et la plus largement utilisée des relations de dominance est la relation de dominance de Pareto. Une solution **a** domine, au sens de Pareto, une solution **b** si et seulement si :

- la solution **a** est au moins aussi bonne que la solution **b** sur tous les critères ;
- la solution **a** est meilleure que la solution **b** sur au moins un critère.

À partir de là, peut alors être définie une solution « Pareto optimale » ou non-dominée au sens de Pareto. Il s'agit tout simplement d'une solution qu'aucune autre solution du problème ne domine. Autrement dit, toutes les solutions qui seraient meilleures que cette solution sur un ou plusieurs critères seront forcément plus mauvaises qu'elle sur au moins un autre critère. Pour cette relation de dominance, l'ensemble des solutions non-dominées d'un problème multicritère est appelé front de Pareto (Deb 2001). La Figure 1-18 propose un exemple illustratif de cette notion, dans le cas d'un problème à deux critères (F1 et F2) à minimiser. À l'instar de la solution C, aucune solution du problème ne domine les solutions appartenant au front de Pareto, auquel les solutions A et B appartiennent. Au sein de cet ensemble de solutions non-dominées, les solutions ne peuvent être comparées au sens de la relation de dominance de Pareto, à l'image des solutions A et B, chacune meilleure que l'autre sur l'un des critères.

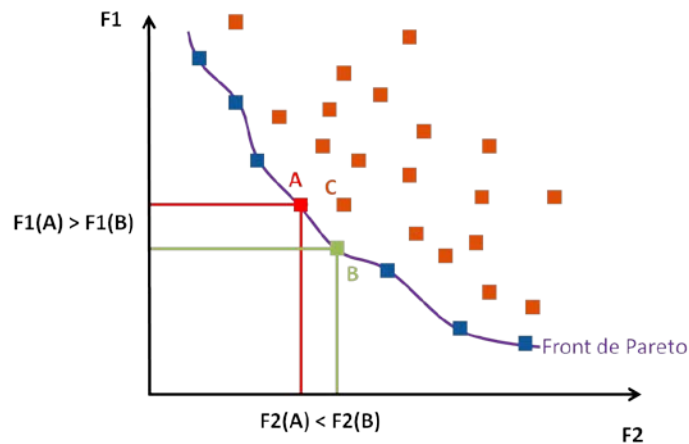


Figure 1-18. Illustration d'un front de Pareto entre deux critères (F1 et F2), de deux solutions du front (A et B), et d'une solution dominée par le front (C)

❖ Points Idéal et Nadir

En multicritère, deux points singuliers sont régulièrement introduits, car pouvant servir à certaines méthodes. Il s'agit des points Idéal et Nadir, illustrés à la Figure 1-19. Le **point Idéal** est le point de l'espace des critères dont les coordonnées sont les bornes des critères du problème d'optimisation considéré. En minimisation multicritère, ces coordonnées correspondront aux bornes inférieures, et en maximisation, aux bornes supérieures. En général, ce point n'appartient pas à une solution du problème, sauf si les critères ne sont pas en conflit. Lorsqu'il est connu, ce point de référence peut permettre de guider le processus d'exploration. Le **point Nadir** peut être vu comme le point contraire au point Idéal. En minimisation multicritère, ses coordonnées correspondront ainsi aux bornes supérieures des critères d'optimisation, et en maximisation, aux bornes inférieures. Tout comme le point Idéal, ce point n'est généralement pas une solution du problème d'optimisation, et est donc différent de la plus mauvaise solution existant sur l'espace de recherche. La connaissance de ce point permet de restreindre l'exploration en bornant les performances des solutions.

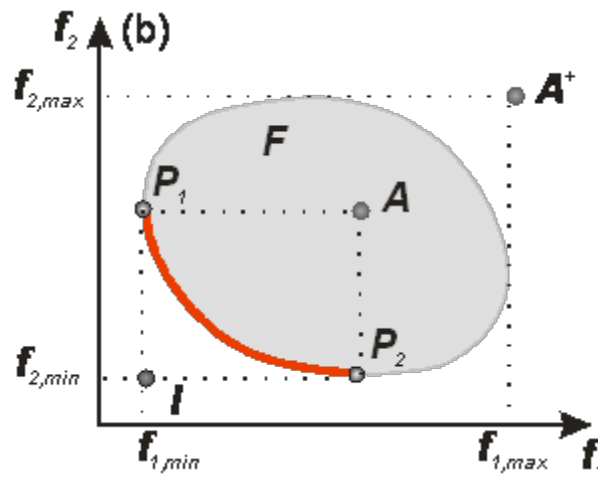


Figure 1-19. Illustration des points Idéal (I) et Nadir (A^+) sur un problème de minimisation à deux critères (f_1 et f_2)

1.3.2.2. REVUES EN OPTIMISATION

❖ Revue de fonctions objectif

La conception des bâtiments est résolument multicritère. Si la fonction première d'un bâtiment est de servir d'abri en protégeant ses habitants et leurs biens des conditions climatiques extérieures et des intrus, de nombreux autres aspects sont à traiter lors de la conception : dimension architecturale et urbaine du projet, stabilité mécanique de la structure, sécurité incendie, confort (thermique, acoustique, visuel, etc.), qualité de l'air intérieur, efficacité énergétique, limitation des impacts environnementaux, viabilité économique, agencement des espaces intérieurs en fonction des activités, etc.

Rivallain (2013) recense une vingtaine d'objectifs et propose de les classer en fonction de la sphère du développement durable à laquelle ils correspondent :

- bilan énergétique et environnemental ;
- bilan économique ;
- aspects sociétaux (en général).

D'après les 75 publications analysées par Evins (2013), et les résultats de l'interview de 28 experts en optimisation interrogés sur leurs pratiques en optimisation, les objectifs les plus couramment utilisés sont liés :

- en premier lieu à l'énergie (généralement la consommation d'énergie en exploitation) ;
- puis au coût (avec plusieurs regards possibles comme le coût de construction, le coût en exploitation, ou le coût sur le cycle de vie) ;
- et enfin au confort (thermique le plus souvent mais aussi visuel plus rarement).

Cependant, les auteurs soulignent aussi que, de manière plus récente, les impacts sur l'environnement deviennent progressivement des critères fréquents en optimisation (Wang, Zmeureanu, et al. 2005), notamment les émissions de CO₂ (ou plus généralement de GES) (Evins et al. 2012; Rapone et Saro 2012; Chantrelle et al. 2011; Hamdy et al. 2011). L'évaluation de ces indicateurs par simulation du cycle de vie reste néanmoins encore peu fréquente (Verbeeck et Hens 2007; Pernodet Chantrelle 2010; Rivallain 2013).

❖ **Revue de contraintes**

Concernant les contraintes considérées, les résultats de l'interview conduite par Attia et al. (2013b) montrent que le confort thermique est la contrainte majoritairement retenue, devant le coût et le ratio entre surfaces vitrées et surfaces opaques, choisies de manière plus minoritaires.

Dans ses travaux de revue, Evins (2013) cite par exemple Hamdy et al. (2011), ayant intégré le confort thermique comme contrainte dans leur problème d'optimisation. Les auteurs ont représenté l'inconfort thermique par un nombre annuel de degrés heures au-dessus de 24 °C (DH₂₄) dans la zone thermique la plus chaude du bâtiment étudié, et ont mené trois optimisations selon différents niveaux d'exigence sur cet indicateur de confort (aucune contrainte sur DH₂₄, DH₂₄ ≤ 2 400 °C.h, et DH₂₄ ≤ 1 000 °C.h).

Également sur la notion de confort thermique, Machairas et al. (2014) mentionnent par exemple Magnier et Haghighat (2010), utilisant l'indice PMV (« *Predicted Mean Vote* », vote moyen prédit). La prise en compte de la contrainte est ici réalisée par une méthode de pénalisation.

Concernant les contraintes liées au coût, Rivallain (2013) étudie des stratégies efficaces de réhabilitation de bâtiments sous la contrainte d'un plan de financement. Castro-Lacouture et al. (2009) intègrent également les contraintes budgétaires dans leur étude d'optimisation, visant à maximiser leur score à l'évaluation du standard nord-américain LEED⁴⁸ (« *Leadership In Energy and Environmental Design* »), sorte d'équivalent à la marque commerciale française HQE⁴⁹ (Haute Qualité Environnementale).

❖ **Revue de variables de décision**

Sur les 75 travaux analysés par Evins (2013), les principales variables de conception explorées concernent l'enveloppe (≈ 40 %), la forme géométrique, les systèmes de chauffage, ventilation, et climatisation (CVC) et les énergies

⁴⁸ <http://www.usgbc.org/LEED/>

⁴⁹ <http://www.assohqe.org/accueil/>

renouvelables pour un peu moins de 20 %, et dans une moindre mesure, la gestion des systèmes et l'éclairage.

Les résultats de l'interview conduite par Attia et al. (2013b) révèlent que les variables de conception les plus fréquentes lors d'une optimisation sont les systèmes et leur gestion (53 %), l'enveloppe (50 %), et les systèmes d'énergie renouvelables (50 %), puis le stockage thermique, l'agencement et la géométrie (25 %). Les gains internes (18 %), l'occupation (11 %) et l'emplacement et le climat (7 %) sont les variables les moins explorées.

Dans la plupart des cas, une optimisation est conduite uniquement sur une catégorie de variables mais certaines études ont fait le choix d'une approche holistique. Bichiou et Krarti (2011) ont montré que les résultats obtenus sont légèrement meilleurs mais que la démarche devient également légèrement plus longue. Dans cette optique, Verbeeck et Hens (2007) ont mis en œuvre un processus en deux étapes : la première optimisant les paramètres de l'enveloppe, et la seconde les caractéristiques des systèmes.

❖ Revue d'algorithmes d'optimisation

De nombreuses classifications des méthodes d'optimisation existent dans la littérature (Evins 2013; Nguyen et al. 2014; Machairas et al. 2014). Nous choisissons ici de présenter celle proposée par Goldberg (1989), distinguant trois catégories d'algorithmes.

1. Les méthodes énumératives

Elles s'appliquent sur des espaces décisionnels à combinatoire finie, et permettent généralement une résolution exacte du problème en contrepartie d'un temps de calcul pouvant rapidement devenir prohibitif. La plus simple mais la moins efficiente de ces méthodes est celle dite « de la force brute » ou « naïve », consistant à évaluer de manière exhaustive toutes les solutions du problème. Cependant, en exploitant les propriétés du problème (lorsqu'elles sont connues), il est possible d'identifier des solutions qui ne pourront pas être candidates pour minimiser (ou maximiser) le problème considéré ou tout du moins qui présenteraient une faible probabilité de l'être, évitant ainsi de les évaluer.

Dans cette optique, citons l'algorithme par « séparation et évaluation » (ou « *branch and bound* » en anglais), souvent utilisé en recherche opérationnelle, et l'algorithme « A* » particulièrement adapté au domaine de l'intelligence artificielle. À l'inverse des deux précédentes méthodes, la **programmation dynamique** ne nécessite pas de connaissances sur le problème à résoudre. Il s'agit d'un algorithme d'optimisation séquentielle se basant sur le principe de (Bellman 1957), stipulant qu'« une politique optimale ne peut être formée que de sous-politiques optimales », pour rechercher le chemin de valeur optimale à partir

de sous-chemins optimaux. Dans cet algorithme, le problème à résoudre est décrit par une variable d'état discrétisée temporellement. À chaque pas de temps, les sous-chemins menant à la même valeur de la variable d'état sont comparés, et seuls ceux qui minimisent (ou maximisent) le(s) critère(s) sont conservés, les autres étant éliminés. Si cette méthode peut être appliquée avec succès pour l'identification de programmes de réhabilitation énergétique séquentielle de bâtiments existants (Rivallain 2013) ou au développement de stratégies de gestion énergétique des bâtiments (Favre 2013; Robillart 2015), elle est impraticable en conception des bâtiments neufs puisque le problème d'optimisation formulé ne peut pas être interprété comme un processus de décision séquentiel (il faut en effet choisir de manière concomitante la valeur de tous les paramètres de conception considérés pour évaluer les performances d'un concept de bâtiment).

Dédiées à l'optimisation combinatoire, les méthodes énumératives n'apparaissent cependant pas adaptées à notre problème : soit elles sont trop gourmandes en temps de calcul (méthode « naïve »), soit elles nécessitent des informations non disponibles dans le cas de fonctions complexes telles que les modèles de STD (algorithmes « par séparation et évaluation » et « A* »), soit la nature des problèmes qu'elles permettent de résoudre est intrinsèquement incompatible avec celle du problème posé dans ces travaux (programmation dynamique).

2. Les méthodes **déterministes**

Ces méthodes initialement créées pour l'optimisation continue nécessitent souvent des propriétés mathématiques sur les fonctions objectifs (continuité, dérivabilité, convexité, etc.). Elles peuvent être divisées en deux catégories : les méthodes déterministes directes et les méthodes déterministes indirectes.

Les premières utilisent directement l'évaluation des solutions sur les fonctions objectifs, et ne nécessitent donc pas d'expression analytique. La **méthode du simplexe** (Dantzig 1951) utilisable en optimisation linéaire, et ses déclinaisons comme la **recherche par motifs de Hooke et Jeeves** (1961) ou la méthode de (Nelder et Mead 1965) s'appliquant à des problèmes non linéaires peuvent être citées en exemples de cette classe de méthodes. Comme le rappelle Pernodet Chantrelle (2010), elles reposent sur l'initialisation puis les transformations successives (homothétie, réflexion, etc.) d'une forme géométrique (un polytope) à $n+1$ sommets (n étant la dimension du problème) dans le but d'identifier des optimum locaux (Chelouah 2000). Ces méthodes souffrent néanmoins d'une double limite : d'une part, la convergence vers l'optimum global est dépendante du point initial (dans le cas des problèmes d'optimisation non linéaires), d'autre part, la description d'une surface de compromis en multicritère nécessiterait d'appliquer ces algorithmes en partant de plusieurs points différents bien choisis,

or leur identification s'avérerait délicate sans une connaissance pointue du problème, comme c'est le cas pour les modèles considérés comme des boîtes noires.

Les secondes exploitent, au contraire des premières, le calcul du gradient et les propriétés mathématiques des fonctions objectifs, pour identifier des optimums locaux voire globaux si les fonctions sont convexes. Ces algorithmes sont généralement appelés **algorithmes à directions de descente**, chacun portant le nom de la direction de descente utilisée (gradient, gradient conjugué, Newton, etc.). Leur utilisation nécessite généralement de disposer d'expression analytique des fonctions, et d'une régularité de ces fonctions, ce qui peut être possible dans certains cas (Kilkis 2006), mais ne l'est en revanche pas directement dans le cas des modèles de STD. Des calculs de gradient numérique sont toutefois possibles à condition de supposer la continuité des fonctions. Ces modèles pourraient aussi être approchés par des modèles dégradés (polynômes d'interpolation) satisfaisant les conditions relativement restrictives d'application de ces algorithmes d'optimisation. Des techniques par krigeage (Matheron 1969) ou par chaos polynomial (Wiener 1938) permettent de construire ces modèles simplifiés (généralement appelés métamodèles). L'enjeu majeur dans ce type d'approche est alors de contrôler les incertitudes additionnelles introduites par l'interpolation.

Notons en remarque générale qu'à l'exception des problèmes d'optimisation linéaires (où un optimum local est un optimum global), il est possible de lever la limite de convergence vers l'optimum global pour les problèmes d'optimisation non linéaires. L'idée est de répéter plusieurs fois le processus d'optimisation avec un point initial différent. Cette technique est couramment appelée « *multistart* » en anglais.

3. Les méthodes **stochastiques**

Cette classe de méthodes regroupe les algorithmes présentant un caractère aléatoire dans leur processus d'exploration. La recherche peut être soit purement aléatoire, et l'optimisation repose alors uniquement sur la mémorisation des meilleures solutions trouvées, soit pseudo-aléatoire, et dans ce cas, l'aléa est au service d'une exploration « intelligente » de l'espace de décision. Si les procédures de recherche purement aléatoires sont peu efficaces et peu robustes, celles dites pseudo-aléatoires permettent généralement de trouver dans un temps limité des solutions efficaces mais pas forcément optimales. Parmi les méthodes stochastiques, les **métaheuristiques stochastiques** sont particulièrement bien adaptées pour la résolution des problèmes complexes auxquels sont confrontés les ingénieurs et les décideurs. Les métaheuristiques réconcilient les méthodes classiques, historiquement dédiées au domaine de l'optimisation continue puis étendues ensuite au domaine discret, avec les heuristiques, initialement développées pour un problème discret spécifique, et

par la suite généralisées pour résoudre plusieurs types de problèmes. Les métaheuristiques s'appliquent ainsi à toutes sortes de problèmes discrets, et peuvent également s'adapter aux problèmes continus. Elles présentent en commun, les caractéristiques suivantes (Collette et Siarry 2002) :

- Elles mettent en œuvre un processus stochastique, permettant de faire face à l'explosion combinatoire.
- Elles sont directes et ne nécessitent donc aucune expression analytique ou condition de régularité sur les fonctions objectifs.
- Elles s'inspirent souvent de systèmes naturels empruntés à la physique (p. ex. procédé de recuit en métallurgie), à la biologie (p. ex. théorie de l'évolution) ou encore à l'éthologie (p. ex. déplacements d'essaims d'insectes ou de volée d'oiseaux).

En contrepartie de pouvoir traiter des problèmes d'« optimisation difficile », ces méthodes présentent comme principaux inconvénients : le réglage des paramètres propres à ces méthodes, la non-garantie de la convergence vers les solutions optimales du problème (Berthiau et Siarry 2001), mais aussi un temps de calcul élevé. Enfin, le choix d'une métaheuristique vis-à-vis d'un problème donné reste actuellement encore un sujet théorique de recherche autant qu'un souci pragmatique pour l'utilisateur. En l'état actuel des connaissances, il n'est en effet pas possible de prévoir de manière certaine l'efficacité d'une métaheuristique pour un problème donné, et aucune métaheuristique n'est statistiquement meilleure qu'une autre sur la classe des problèmes sur lesquels elles sont applicables. Ce constat a été formalisé par Wolpert et Macready (1997) sous le nom des théorèmes « *No Free Lunch* ».

Les métaheuristiques peuvent être dissociées en deux catégories : les méthodes opérant par trajectoire (dites **métaheuristiques de voisinage**), et celles manipulant une population (dites **métaheuristiques distribuées**).

Les métaheuristiques de voisinage peuvent être assimilées à une recherche locale, faisant progresser une seule solution à la fois. En optimisation multicritère, une itération « intelligente » de ces méthodes est requise pour répondre à l'objectif double d'éviter un minimum local, et de décrire le plus largement possible l'ensemble des compromis accessibles du problème. Parmi les principales méthodes, peuvent être cités : le recuit simulé (Kirkpatrick et al. 1983; Kirkpatrick 1984), la recherche tabou (Glover 1989; Glover 1990), la recherche à voisinage variable (Mladenović et Hansen 1997), l'escalade de collines (« *hill climbing* ») (Russell et al. 1995), les procédures GRASP (« *Greedy Randomised Adaptative Search Procedures* ») (Feo et Resende 1989), ou encore la recherche locale itérative (Lourenço et al. 2003). À titre d'illustration de cette catégorie de métaheuristiques, nous présentons le principe de fonctionnement de la recherche tabou. Cette méthode est une recherche locale basée sur la notion de voisinage, ensemble des configurations accessibles par une unique

modification élémentaire de la solution courante (Berthiau et Siarry 2001). Tout ou partie du voisinage est évalué, et la meilleure solution obtenue remplace alors la solution courante. Ce meilleur « voisin » pouvant être de performances moindres que la solution précédente, l'algorithme a ainsi la capacité de s'extraire d'un optimum local. De plus, l'algorithme garde en mémoire les dernières meilleures solutions explorées, considérées alors taboues, ce qui permet de poursuivre la recherche, sans retour cyclique à ces solutions connues. Pour des raisons d'efficacité algorithmique et de taille mémoire, cette liste taboue est généralement limitée aux solutions les plus récemment visitées.

Les métaheuristiques distribuées, au contraire des métaheuristiques de voisinage, font évoluer simultanément un ensemble de solutions du problème (généralement appelé une population), ce qui permet de fournir directement la surface de compromis du problème. De nombreux algorithmes existent dans la littérature dont les algorithmes évolutionnaires, p. ex. les algorithmes génétiques (Chapitre 3), les algorithmes à évolution différentielle (Storn et Price 1997), ou les algorithmes d'estimation de distribution (Larrañaga et Lozano 2001), les algorithmes d'intelligence distribuée tels que les colonies de fourmis (Dorigo 1992), les essaims particuliers (Eberhart et Kennedy 1995) et les colonies d'abeilles artificielles (Karaboga 2005), ou encore la recherche dispersée (Glover et al. 2000). À titre d'illustration de cette catégorie de métaheuristiques, nous présentons le principe de fonctionnement des colonies de fourmis, à travers l'exemple de la recherche de nourriture. Au départ, les fourmis, dans leur quête alimentaire, explorent leur environnement de manière aléatoire, en déposant lors de leurs déplacements une piste de substances volatiles (les phéromones), dont l'intensité influence leurs congénères. L'intelligence collective des fourmis se met en place petit à petit, au fil des allers-retours entre le nid et la source de nourriture. En effet, entre tous les chemins possibles, le plus court sera, sur une durée équivalente, parcouru par davantage de fourmis que les autres chemins. L'intensité de la piste de phéromones attirera donc, localement mais progressivement, toute la colonie. Pour reproduire ce comportement naturel, deux paramètres de modélisation sont utilisés : la visibilité et l'intensité. La visibilité traduit les performances d'un segment (inverse de la distance dans les recherches de plus court chemin) et l'intensité le nombre d'individus ayant utilisé ce segment. Plus la visibilité et l'intensité d'un segment sont élevées, plus la probabilité qu'il soit retenu par des individus de l'itération suivante est grande.

Enfin, signalons l'émergence de méthodes hybrides, dont le but est de profiter des avantages spécifiques de plusieurs méthodes en les associant. Talbi (2002) propose une taxinomie de ces métaheuristiques hybrides. Dans le domaine du bâtiment, Hasan et al. (2008) combinent par exemple une exploration globale par essaims particuliers avec une recherche par algorithme de Hooke-Jeeves permettant d'affiner les solutions dans un second temps. L'idée est la même dans

les travaux de Hamdy et al. (2009), utilisant un algorithme mémétique (Moscato 1989), hybridation d'un algorithme génétique avec une recherche locale remplaçant ou succédant à la mutation.

❖ Revue de plateformes d'optimisation

Pour mettre en œuvre ces méthodes d'optimisation en pratique, différentes possibilités existent, allant de celles offrant le maximum de flexibilité à celles offrant le plus de fonctionnalités directement disponibles, ces deux aspects étant globalement antagonistes, Citons :

- Les **environnements de programmation**, tels que *Matlab*, *Python*, *R* et bien d'autres, disposant de riches bibliothèques d'algorithmes d'optimisation. Le degré de flexibilité est maximal en contrepartie de quoi un travail conséquent est à fournir pour automatiser le processus et proposer différentes fonctionnalités avantageuses à l'utilisateur (analyse et visualisation des données, outils d'aide à la décision, étude de fiabilité, etc.).
- Les **plateformes d'intégration**, pouvant être multidisciplinaires (p. ex. *MODEFrontier*) ou spécialisées dans un domaine mais permettant d'intégrer plusieurs outils métiers (p. ex. *GenOpt*), et utilisant généralement des fichiers textes pour rendre les communications possibles.
- Les **outils dédiés**, présentant le plus de facilité d'utilisation (interfaces conviviales, fonctionnalités automatiques, etc.), mais le plus souvent en contrepartie d'une limitation des possibilités (choix des méthodes, absence partielle ou totale d'interopérabilité, formulation restreinte des problèmes, etc.). Par exemple *BEopt*⁵⁰, l'outil du National Renewable Energy Laboratory (NREL) fonctionnant avec *DOE2.2* et *EnergyPlus* via une interface graphique ; *GENE_ARCH* utilisant des algorithmes génétiques liés à *DOE-2* (Caldas 2008), ou encore *MultiOpt*, pour l'optimisation multicritère de projets de rénovation avec *TRNSYS* (Chantrelle et al. 2011). Si tous ces outils ont été développés pour l'optimisation en lien avec des outils métiers, des méthodes d'optimisation ont aussi été directement intégrées dans des outils commerciaux déjà existants, c'est par exemple le cas de *DesignBuilder*⁵¹, interface d'*EnergyPlus*, proposant la possibilité de réaliser une optimisation multicritère sur de nombreuses variables, à l'aide de l'algorithme NSGA-II.

⁵⁰ <http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/37733.pdf>

⁵¹ <http://www.designbuilder.co.uk/>

❖ Applications à la conception ou la réhabilitation de bâtiments

Le développement de plateformes d'optimisation témoigne de l'intérêt croissant que portent de nombreuses communautés, dont celle du bâtiment, aux techniques d'optimisation. Toutes les revues étudiées à ce sujet, Banos et al. (2011); Stevanović (2013); Attia et al. (2013b); Evins (2013); Nguyen et al. (2014) et Machairas et al. (2014), font état, d'une augmentation forte (parfois exponentielle) durant ces vingt dernières années environ du nombre de publications concernant l'application de ces techniques.

Dans le domaine du bâtiment, différents algorithmes ont été mis à contribution. Bouchlaghem et Letherman (1990) appliquent entre autres la méthode du simplexe pour minimiser le niveau d'inconfort en faisant varier les propriétés de matériaux de construction alors que Peippo et al. (1999) se servent de l'algorithme de recherche par motifs de Hooke et Jeeves pour identifier des cibles énergétiques adéquates en vue d'obtenir des niveaux de coût optimaux pour la conception de bâtiments solaires à basse énergie. La méthode par recuit simulé a par exemple été utilisée par Nielsen (2002) pour optimiser la géométrie et les composants d'un bâtiment de bureaux. Marszal et al. (2010) ont exploité quant à eux un algorithme par essais particuliers pour optimiser cinq objectifs (le confort vibratoire des planchers intermédiaires, le confort thermique estival, les besoins de chauffage, l'énergie grise, et le potentiel de réchauffement global) dans le cadre de bâtiments bois multiétages. Yuan et al. (2012) ont utilisé une optimisation multicritère par colonies de fourmis pour minimiser, sous plusieurs aspects, la consommation énergétique sur le cycle de vie.

Si une certaine diversité de méthodes employées peut être observée, Evins (2013) souligne la grande popularité dont jouissent les algorithmes génétiques (une majorité des 75 publications étudiées par l'auteur utilise ces techniques), devant les méthodes directes et d'autres méthodes évolutionnaires (notamment l'optimisation par essais particuliers). Znouda et al. (2007) explorent ainsi à l'aide d'un algorithme génétique différentes alternatives (composition des parois, compacité, taille des ouvertures, protections solaires) pour optimiser la conception de bâtiments neufs méditerranéens en considérant une agrégation des critères d'intérêt. Caldas (2008) illustre sur plusieurs études de cas, et en formulant différents problèmes d'optimisation, les possibilités de l'outil *GENE_ARCH* pour identifier des solutions architecturales efficaces pour réduire la consommation énergétique du bâtiment, mais aussi l'énergie grise et le potentiel de réchauffement climatique des matériaux mis en œuvre. Panão et al. (2008) explorent également avec un algorithme génétique le potentiel d'efficacité énergétique de plusieurs possibilités de formes urbaines pour les climats de moyenne latitude. Dans la rénovation des bâtiments, Pernodet Chantrelle (2010) et Rivallain (2013) mettent entre autre en œuvre un algorithme génétique élitiste de tri non-dominé (NSGA-II) pour identifier des stratégies de réhabilitation

efficaces pour des bâtiments de logement ou tertiaire, en avec ou sans phasage des bouquets de travaux, et sous une approche globale de la performance ciblant les consommations énergétiques, les coûts, le bilan environnemental, et le confort thermique. En conception de bâtiments neufs, une approche multicritère intéressante sur le cycle de vie est proposée par Wang, Zmeureanu, et al. (2005) et Wang et al. (2006), où des variables notamment portées sur la géométrie et l'enveloppe (compacité, surfaces vitrées et types de vitrage, compositions des façades, etc.) sont explorées selon deux critères : le coût global sur le cycle de vie et la consommation cumulée d'exergie). Un cadre formalisé pour rendre l'optimisation davantage générique a également été proposé (Wang, Rivard, et al. 2005). Carlucci et al. (2015) visent à l'aide d'un algorithme NSGA-II à minimiser l'inconfort visuel et l'inconfort thermique dans le cas d'un NZEB. Les paramètres explorés sont la résistance thermique des murs, du plancher et de la toiture, les performances thermiques des vitrages, différentes stratégies de gestion des protections solaires, et les possibilités de rafraîchissement nocturne. Les travaux Verbeeck et Hens (2007) issus notamment des travaux de doctorat de Verbeeck (2007) apportent une contribution particulièrement intéressante. Les auteurs étudient en effet le développement d'une démarche globale pour optimiser les concepts de maisons individuelles à très basse énergie, via une approche multicritère où les aspects économiques comme environnementaux sont évalués sur tout le cycle de vie, notamment par la mise en œuvre d'une ACV. Les auteurs mettent en place un processus en deux étapes : la première optimisant les paramètres de l'enveloppe, et la seconde les caractéristiques des systèmes, sans toutefois envisager de systèmes de production d'énergie renouvelable. En outre, ils ont également étudié la robustesse de leur démarche en effectuant une analyse de sensibilité et une propagation d'incertitudes, et en questionnant notamment la fiabilité de la base de données environnementale ou l'évolution des prix de l'énergie.

1.3.2.3. PRINCIPAUX VEROUS À L'INTÉGRATION DE L'OPTIMISATION

Si le paragraphe précédent a pu mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation de l'optimisation, différents verrous ralentissent néanmoins l'intégration de cette approche dans les pratiques des professionnels du bâtiment. Les experts interrogés par Attia et al. (2013b) mettent effectivement en évidence des obstacles non techniques et techniques à l'intégration de l'optimisation dans les outils de conception, notamment pour la conception de bâtiments à énergie positive. Les **obstacles non techniques** concernent, dans l'ordre décroissant d'importance :

- le manque actuel de retours et de reconnaissance de cette pratique au sein de l'industrie du bâtiment ;

- le manque d'approches systématiques standardisées permettant une utilisation générique dans la plupart des cas rencontrés ;
- la nécessité d'un haut niveau d'expertise ;
- la faible confiance dans les résultats.

Les **obstacles techniques** concernent, dans l'ordre décroissant d'importance :

- les incertitudes pesant sur les entrées des modèles ;
- les temps de calcul élevés ;
- le manque d'information sur les coûts, les scénarios d'usage, etc. ;
- la difficulté de définir un problème d'optimisation (p. ex. composer avec différents critères ou la violation de contraintes) ;
- le manque d'environnements intégrés (simulation, optimisation) offrant une utilisation fluide ;
- la faible interopérabilité des modèles existants pour échanger des données de conception, de construction, de simulation, d'estimation de coûts, ou d'optimisation ;
- et le manque d'interfaces utilisateur conviviales, disposant de techniques de post-traitement et de visualisation des résultats.

Dans ces travaux de thèse, nous nous proposons d'aborder principalement les aspects de temps de calcul, d'incertitudes en entrée des modèles (notamment en lien avec le comportement des occupants), de fiabilité des modèles et des solutions, mais aussi d'analyse et d'exploitation des résultats dans une moindre mesure.

La problématique des temps de calcul nous semble effectivement importante car ce peut être un frein majeur à une première prise en main de l'optimisation par les professionnels, étape pourtant charnière dans l'objectif de diffuser cette nouvelle approche. La thématique des incertitudes est également centrale puisque leur étude permet d'évaluer voire de renforcer le degré de confiance dans les outils et la démarche globale. Enfin, il convient aussi de porter une attention particulière au développement d'approches et de fonctionnalités pouvant permettre d'améliorer la pratique des utilisateurs de ces outils dans le but de servir et faciliter le processus de décision.

1.3.3. Méthodes complémentaires à l'optimisation

Pour tenter de lever les verrous identifiés dans le paragraphe précédent, différentes méthodes peuvent être envisagées. Elles sont synthétiquement présentées ci-dessous.

❖ **Analyse de sensibilité**

Les analyses de sensibilité permettent d'étudier comment les variations des entrées d'un modèle engendrent des variations de ses sorties. Plus précisément, elles permettent d'évaluer comment les entrées d'un modèle interagissent vis-à-vis des sorties et d'estimer la contribution de chacune de ces entrées aux variations observées sur les sorties, offrant ainsi la possibilité d'identifier les variables les plus influentes d'un modèle.

En conception des bâtiments, ces méthodes offrent ainsi la possibilité de réduire la combinatoire de l'espace de décision en éliminant les variables de conception qui n'auraient que peu d'impacts sur les critères donnés, permettant de se concentrer davantage sur les véritables leviers de performance identifiés.

Ces méthodes présentent un intérêt pratique significatif, et seront à ce titre plus amplement développées dans le chapitre 2, dédié aux analyses de sensibilité et d'incertitudes, et à la fiabilité des modèles.

❖ **Analyse d'incertitudes**

Les analyses d'incertitudes permettent d'évaluer le niveau de variation des sorties d'un modèle engendré par les variations des entrées de ce modèle. Face à des incertitudes multiples (comportement des occupants, caractéristiques thermiques des matériaux, débits de ventilation, etc.), ces méthodes offrent ainsi la possibilité d'estimer un degré de fiabilité dans les résultats de simulation obtenus, et de progresser vers la garantie de performance énergétique par exemple. Ces méthodes présentent un intérêt pratique significatif, et seront à ce titre plus amplement développées dans le chapitre 2.

❖ **Paramétrage**

L'utilisation de méthodes d'optimisation, et principalement de métaheuristiques, nécessite très souvent l'introduction de paramètres propres à la méthode appliquée, et pouvant impacter sensiblement les performances d'un algorithme. Le paramétrage consiste à étudier quelles valeurs de ces paramètres permettraient d'obtenir les meilleures performances de résolution pour l'algorithme en question. Il peut ainsi être vu comme un problème d'optimisation en soi.

Ce réglage des paramètres spécifiques à chaque métaheuristique constitue un réel souci pragmatique pour les utilisateurs de ce type d'algorithmes. Il n'existe effectivement pas de valeurs optimales uniques pour chaque métaheuristique, car ces valeurs dépendent fortement du problème à résoudre. Sans une connaissance fine du problème, et du comportement de l'algorithme, le paramétrage devient rapidement une étape délicate, et souvent négligée. Dans le but de faciliter l'usage de ces méthodes par les professionnels du secteur, un

travail sur le paramétrage d'une métaheuristique sera réalisé dans la partie 5.5, dont la méthodologie est décrite dans la partie 3.3.

❖ **Optimisation robuste**

L'optimisation robuste consiste à intégrer les incertitudes au sein même du processus d'optimisation. Par exemple, des solutions certes moins performantes que d'autres pourraient alors être retenues par l'optimisation robuste car elles présenteraient des risques moins élevés d'avoir des performances dégradées, bien que peu probables. Si l'approche est séduisante, elle requiert en général à la fois des simulations pour l'optimisation, et pour l'analyse d'incertitudes, la rendant inapplicable en pratique à l'exception de modèles simples ou dégradés dont les temps de simulation sont très faibles. Pour l'heure, les travaux de Hopfe et al. (2012) sont probablement l'une des rares mises en œuvre de ce type de démarche dans le domaine du bâtiment. Malgré ce champ de recherche naissant et potentiellement très intéressant, l'optimisation robuste ne nous semble pas encore applicable en pratique. La puissance de calcul des ordinateurs dont disposent actuellement les professionnels serait en effet trop limitée pour un usage avec des modèles détaillés, et les incertitudes pesant pour l'instant sur la précision des modèles dégradés apparaissent encore trop élevées vis-à-vis de celles qui pourraient être intégrées dans cette approche. Dans ce contexte, l'optimisation robuste est ainsi considérée hors champ de ces travaux de thèse.

❖ **Analyse des solutions et aide à la décision**

L'optimisation n'est pas une fin en soi, et doit plutôt être vue comme une méthode au service du processus de prise de décision. Les méthodes d'aide multicritère à la décision correspondent à un panel de techniques et de stratégies servant à faciliter ce processus dans un problème décisionnel complexe (multitude de critères, nombreuses incertitudes, contraintes fortes et préférences antagonistes de différents décideurs, etc.). Elles présentent de nombreux avantages et seraient ainsi intéressantes à étudier dans le but de développer une démarche permettant de fournir une aide à la décision pour l'écoconception de maisons à énergie positive. Néanmoins, elles nécessitent l'introduction d'une forme d'information préférentielle, donnée subjective pouvant fortement varier en fonction des acteurs en situation, ce qui relève du champ des sciences humaines et sociales. De plus, l'application de ces méthodes requiert d'avoir déjà identifié un ensemble de solutions efficaces au problème, ce qui peut être avantageusement mené par les méthodes d'optimisation multicritère.

Aussi, ces travaux de thèse se concentrent tout d'abord sur cette étape préliminaire d'identification, nécessaire à toute application de méthodes d'aide multicritère à la décision, méthodes offrant une perspective intéressante, et

complémentaire à l'approche retenue ici. Ces travaux proposent néanmoins de contribuer à l'analyse des solutions, et à l'extraction d'informations pertinentes pour la prise de décisions (partie 5.3). Dans cette optique, l'étude sous quelques aspects de la robustesse des solutions obtenues est également un axe de travail retenu dans ces travaux, et sera présenté dans la partie 5.4. Cette approche se distingue de l'optimisation robuste par une prise en compte des incertitudes uniquement *a posteriori* du processus d'optimisation, mais limitant en contrepartie les temps de calcul. Elle peut être considérée comme un premier pas vers l'optimisation robuste.

1.4. DÉMARCHE PROPOSÉE

Suite à l'état de l'art réalisé dans les sections précédentes, une démarche permettant de fournir une aide à la décision pour l'écoconception de maisons à énergie positive peut finalement être proposée. Cette section vise à présenter les principaux choix retenus.

Face au constat d'une pression anthropique non soutenable, l'impératif de développement durable nous invite à dépasser le cadre presque purement énergétique de la définition actuelle des bâtiments à énergie positive, et de l'étendre autant que possible selon les trois sphères du développement durable (économique, sociale, et environnementale). L'intégration des aspects environnementaux en conception nécessite de mettre en œuvre d'une démarche d'écoconception des bâtiments dont l'analyse de cycle de vie est l'outil privilégié. Dans une perspective de développement durable, le système considéré dans ces travaux sera étudié sur selon les critères de décision suivants :

- bilan énergétique annuel (énergie primaire) sur les usages réglementaires, l'électricité spécifique et la production d'ENR ;
- impacts environnementaux sur le cycle de vie du bâtiment (*a minima* : consommation d'énergie primaire cumulée, potentiel de réchauffement climatique, consommation d'eau, et production de déchets) ;
- coût de construction ;
- confort thermique des occupants.

L'objectif annoncé est d'identifier des concepts de maisons minimisant conjointement impacts environnementaux et coût de construction, sous contrainte de bilan énergétique positif, et respectant *a posteriori* un critère de confort. Le bilan énergétique sera exprimé sur une année, en énergie primaire, et considérera tous les usages. Le confort thermique des occupants sera évalué via un taux d'inconfort thermique, correspondant au nombre d'heures occupées où la température est en dehors d'une plage donnée (ici [16; 27] °C).

Pour comparer plusieurs variantes de conception, il faut définir une unité fonctionnelle, comme socle de référence pour les comparaisons. Nous proposons de retenir l'unité fonctionnelle suivante :

- fonction : loger des occupants ;
- qualités de la fonction : dans des conditions sanitaires et de confort satisfaisantes, avec une production d'énergie renouvelable locale sur la parcelle du bâtiment permettant de satisfaire un bilan énergétique positif ou au moins neutre tous usages ;
- quantité : 1 m² de surface habitable équivalent de maison individuelle ;
- durée d'étude : 100 ans, soit la durée de vie considérée d'une maison.

Pour permettre l'évaluation des performances, nous choisissons d'utiliser :

- un modèle de simulation thermique dynamique des bâtiments (*COMFIE*) ;
- un modèle d'analyse de cycle de vie des bâtiments (*novaEQUER*) ;
- une base de données de coûts.

Plusieurs raisons permettent de justifier la sélection des deux outils retenus :

- *COMFIE* a été soumis avec succès à différents protocoles de validation (détails dans le chapitre 2).
- *COMFIE* est un modèle réduit par analyse modale ce qui permet disposer d'un compromis intéressant entre temps de calcul et précision des résultats, notamment dans l'optique d'appliquer un algorithme d'optimisation.
- *COMFIE* et *novaEQUER* appartiennent à la même suite logicielle, ce qui permet de réduire les efforts de saisie. De plus, ils ont été développés dans un paradigme orienté objet, ce qui offre une structure modulaire facilitant l'intégration de composants complémentaires.

Concernant le modèle économique, des fonctions de coût réalistes ont été établies grâce à la collaboration de constructeurs de maisons individuelles et d'industriels, dans le cadre du projet COMEPOS (A-2). Pour des raisons de confidentialité, ces fonctions ne pourront cependant pas être explicitées dans le manuscrit.

Cette démarche sera assistée par optimisation multicritère, approche permettant d'identifier des concepts de bâtiments efficaces et de décrire le plus largement possible les compromis accessibles du problème d'optimisation formulé. La nature de ce problème – combinatoire et à fonctions dont l'expression analytique est difficilement accessible voire inaccessible – a conditionné le choix dans ces travaux d'un algorithme d'optimisation stochastique : l'algorithme génétique élitiste de tri non-dominé (NSGA-II).

L'efficacité des algorithmes génétiques est en effet reconnue et a été éprouvée. Parmi-eux, l'algorithme NSGA-II développé par Deb et al. (2002) a déjà été largement utilisé, ce qui permet de disposer d'un retour d'expérience pouvant être utile pour sa mise en place et son paramétrage (opération difficile mais influente que nous avons choisie d'aborder dans ces travaux). Une description détaillée de cet algorithme est proposée dans le chapitre 3. Une approche multicritère « vraie » (selon la relation de dominance de Pareto) a été préférée à une conversion de l'aspect résolument multicritère du problème réel en un problème d'optimisation monocritère exploitant un système de pondération basé sur l'introduction d'une subjectivité *a priori* dans la recherche de solutions non-dominées.

Appliquer des techniques d'optimisation à des modèles complexes tels que ceux représentant le comportement thermique d'un bâtiment et permettant d'évaluer ses impacts environnementaux soulève néanmoins un certain nombre de difficultés. Des problématiques de temps de calcul, de gestion des incertitudes, de fiabilité des modèles, d'analyse et de robustesse des solutions nécessitent en effet d'être étudiées. Pour tenter de répondre à ces verrous scientifiques, nous proposons d'appliquer des méthodes complémentaires à l'optimisation telles que :

- l'analyse de sensibilité, dans le but d'identifier les paramètres de conception les plus influents, et de réduire la combinatoire du problème d'optimisation ;
- l'analyse d'incertitudes, pour étudier le degré de fiabilité d'un modèle ou d'un concept de bâtiment.

Un modèle stochastique de comportement des occupants (Vorger 2014), basé sur des données statistiques, sera également mis à contribution pour générer des scénarios d'usage plus réalistes, ce qui permettra de progresser vers des solutions plus robustes. De même, des scénarios climatiques prospectifs issus des travaux du GIEC permettront l'étude de la non-robustesse des décisions de conception vis-à-vis de l'évolution prévisible du climat d'ici la fin du siècle. Pour orchestrer l'utilisation de l'ensemble des modèles et outils retenus, une plateforme informatique basée sur l'environnement de programmation *R* est proposée.

L'étude s'appuiera sur l'expérience d'un processus de conception en temps réel, appliqué à une maison individuelle à énergie positive. L'approche sera testée sur une étude de cas réelle grâce à une collaboration avec des constructeurs de maisons individuelles et des industriels fournisseurs de produits de construction (projet COMEPOS).

1.5. CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce premier chapitre a permis de poser le cadre de ces travaux de thèse, dont l'objectif est d'étudier une démarche permettant de fournir une aide à la décision pour l'écoconception de maisons à énergie positive.

L'état de l'art a amplement souligné la pluralité des définitions du bâtiment à énergie positive, la variété des critères de décision retenus en conception des bâtiments, et la diversité des solutions techniques pouvant être explorées. La nécessité de réaliser des choix et d'adopter une approche multicritère, sur tout le cycle de vie du bâtiment, intégrant les aspects environnementaux et les interactions entre le bâtiment, son environnement et ses occupants, a également pu être mise en évidence.

Face à cette problématique complexe d'aide à la décision, les techniques d'optimisation multicritère, basées sur l'utilisation d'une relation de dominance, semblent être particulièrement bien adaptées pour identifier des solutions efficaces et une surface de compromis, pré-requis nécessaire à l'usage de toutes méthodes d'aide multicritère à la décision. La nature mathématique du problème formulé – combinatoire et à fonctions dont l'expression analytique est difficilement accessible voire inaccessible – a conditionné le choix dans ces travaux d'un algorithme d'optimisation stochastique : l'algorithme génétique NSGA-II.

Si l'augmentation des performances de calcul des ordinateurs a rendu possible l'utilisation de ces techniques d'optimisation, leur coût en temps de calcul peut encore rapidement devenir prohibitif, limitant leur potentialité. La gestion des incertitudes ou l'interprétation multicritère des résultats constituent d'autres verrous à lever pour fournir une aide à la décision opérationnelle et robuste.

Dans cette optique, le chapitre suivant se consacrera aux méthodes d'analyses de sensibilité et d'incertitude, destinées à l'identification des paramètres de conception les plus influents, la validation expérimentale d'un modèle de simulation thermique dynamique, et les possibilités de contribuer à la robustesse des solutions d'optimisation. Le chapitre 3 correspondra au choix et à la description de l'algorithme génétique, ainsi que d'une démarche pour étudier son paramétrage. Le chapitre 4 permettra quant à lui de présenter les développements informatiques réalisés afin de mettre en œuvre la démarche globale proposée. Enfin, le cinquième et dernier chapitre sera l'occasion d'appliquer l'ensemble de la démarche à une étude de cas.

Chapitre 2. Analyse de sensibilité, analyse d'incertitude, et fiabilité des modèles

Appliquer des techniques d'optimisation à des modèles complexes tels que ceux représentant le comportement thermique d'un bâtiment et permettant d'évaluer ses impacts environnementaux soulève un certain nombre de difficultés, dont notamment limiter la durée des calculs, analyser la robustesse des solutions finales obtenues, et s'assurer du bon comportement des modèles utilisés dans le contexte des bâtiments à haute performance énergétique. L'objectif de ce chapitre est d'étudier dans quelle mesure les méthodes d'analyses de sensibilité et d'incertitude permettent de répondre à ces enjeux. Pour ce faire, un état de l'art sur ces méthodes est tout d'abord réalisé, permettant par la suite de choisir et de décrire une méthodologie adaptée à la problématique exposée. Enfin, le développement et la mise en œuvre d'une démarche de validation expérimentale d'un modèle de simulation thermique dynamique sont présentés, illustrant l'intérêt des méthodes retenues et justifiant l'utilisation de ce modèle dans la suite de ces travaux.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 2

2.1. Introduction.....	89
2.2. État de l'art.....	90
2.2.1. Définitions et concepts de base	90
2.2.2. Analyse d'incertitude	93
2.2.3. Analyse de sensibilité	98
2.2.4. Fiabilité des modèles.....	108
2.2.5. Applications dans le domaine du bâtiment	119
2.2.6. Conclusion sur l'état de l'art	122
2.3. Étude de cas – Méthodologie	123
2.3.1. Démarche et objectifs	123
2.3.2. Modèle thermique de bâtiment	124
2.3.3. Cas d'étude.....	125
2.3.4. Analyses de sensibilité et propagation d'incertitudes.....	126
2.4. Étude de cas - Résultats.....	133
2.4.1. Opération de criblage	133
2.4.2. Propagation d'incertitudes	137
2.4.3. Analyse de sensibilité globale.....	141
2.4.4. Conclusion sur l'étude de cas	144
2.5. Conclusion du chapitre	144

2.1. INTRODUCTION

L'objectif de cette thèse est d'étudier une démarche mettant à profit l'optimisation multicritère dans le but de fournir une aide à la décision pour l'écoconception de maisons à énergie positive. Appliquer des techniques d'optimisation à des modèles complexes tels que ceux représentant le comportement thermique d'un bâtiment et permettant d'évaluer ses impacts environnementaux soulève néanmoins un certain nombre de difficultés. Parmi les principaux verrous identifiés dans le chapitre 1 figurent :

- la durée des calculs ;
- la fiabilité des modèles de calcul ;
- et la robustesse des solutions.

En fonction du nombre de paramètres de conception étudiés et du nombre de valeurs que peut prendre chaque paramètre, la combinatoire de l'espace de décision peut en effet rapidement s'amplifier. L'exploration de l'espace pourrait alors engendrer des temps de calcul prohibitifs pour les professionnels. Dans ce contexte, identifier les principaux leviers de la performance permettrait d'orienter les efforts d'optimisation sur les paramètres de conception les plus influents, limitant ainsi le nombre de possibilités à explorer.

Une fois le processus d'optimisation effectué, il semble également intéressant d'analyser les solutions trouvées au regard des incertitudes pesant sur les entrées des modèles (partie 5.4). Deux questions principales se posent :

- Est-ce que le niveau de ces incertitudes est tel qu'il serait susceptible de modifier les solutions identifiées par l'optimisation, et donc les choix en conception ?
- Dans l'objectif de progresser vers un dispositif de garantie de performance énergétique, est-il possible d'estimer la variabilité engendrée par ces incertitudes sur les performances prévues en conception ?

De par les enjeux scientifiques et techniques soulevés, ces questions constituent un champ de recherche à part entière, et dépassent largement le périmètre de ces travaux de thèse dont l'ambition est d'aborder ces questions seulement de manière partielle, sous la forme d'une première contribution devant être complétée par des travaux ultérieurs.

La réflexion à ces sujets appelle aussi à questionner la fiabilité intrinsèque des modèles, au-delà des incertitudes sur les entrées. Dans le contexte des bâtiments à haute performance énergétique, différentes hypothèses de modélisation pourraient en effet être mises en défaut du fait de la prépondérance nouvelle de phénomènes physiques. La robustesse des solutions passera ainsi nécessairement par une validation des outils de simulation.

Les analyses de sensibilité et d'incertitude (ASAI) offrent des possibilités intéressantes pour répondre à la problématique globale exposée ci-dessus, justifiant d'y consacrer le présent chapitre.

2.2. ÉTAT DE L'ART

Cette partie a pour but de dresser un état de l'art sur l'analyse de sensibilité et l'analyse d'incertitude (ASAI), ainsi qu'un point succinct sur la fiabilité des modèles. Dans un premier temps, plusieurs définitions et concepts de base sont introduits (section 2.2.1) permettant de décrire les méthodes dans un second temps (sections 2.2.2 et 2.2.3). Finalement, la dernière partie est davantage applicative, et traite de la fiabilité des modèles (section 2.2.4) et de l'utilisation des méthodes d'ASAI dans le domaine du bâtiment (section 2.2.5).

2.2.1. Définitions et concepts de base

❖ Définitions

Un **modèle** numérique est un ensemble de fonctions mathématiques décrivant un phénomène physique. Il a pour but de reproduire par simulation des lois et des procédés régissant des systèmes souvent complexes.

Pour effectuer les simulations numériques, le modèle nécessite un ensemble d'informations appelées **facteurs d'entrée** pouvant être, soit dynamiques (et qualifiés de **variables** d'entrée), soit statiques (et qualifiés de **paramètres** d'entrée).

Généralement, les variables et les paramètres d'entrée peuvent être de nature très diverse. Dans le cas des modèles de simulation thermique de bâtiment, ce peut être par exemple les dimensions géométriques, les caractéristiques thermiques de l'enveloppe, considérées constantes, les scénarios d'usage ou encore les performances des systèmes.

En retour de ces informations, le modèle fournit des **sorties** faisant état des résultats des simulations effectuées. Pour les modèles thermiques, cela peut être un besoin de chauffage annuel ou bien les températures horaires d'une zone thermique. Pour les modèles d'analyse de cycle de vie, cela sera par exemple les émissions de CO₂ ou la quantité de déchets générée par le bâtiment sur son cycle de vie.

Les **variables d'intérêt** correspondent aux grandeurs sur lesquelles l'analyse (de sensibilité ou d'incertitude) sera menée. Elles prennent généralement la

forme d'indices calculés à partir des sorties brutes d'un modèle. Pour les professionnels, il pourra s'agir d'une consommation annuelle, ou d'un taux d'inconfort thermique par exemple. En pratique, les termes de sortie et de variable d'intérêt sont couramment confondus.

L'**incertitude** traduit, dans son sens général, un défaut d'exactitude dans la représentation d'une qualité. Dans notre contexte, elle peut avoir diverses origines : un manque de connaissance (p. ex. carence de données), une imprécision de mesure (p. ex. dans la caractérisation thermique de matériaux), une erreur ou des choix de modélisation (oubli ou approximation non satisfaisante d'un phénomène important)...

La **variabilité** se distingue de l'incertitude par le fait qu'elle ne peut être réduite en améliorant notre connaissance du système étudié. La variabilité correspond à la variation stochastique et immuable d'une grandeur (p. ex. les conditions climatiques selon les années). Il faut essayer de prendre en compte toute la variabilité pour connaître l'étendue des valeurs possibles qu'une grandeur peut prendre.

Les méthodes d'analyse de sensibilité et d'analyse d'incertitude (ASAI) dites **externes** sont celles où le modèle est vu comme une boîte noire. Les valeurs des paramètres d'entrée subissent des variations qui sont ensuite transmises au modèle pour obtenir les sorties correspondantes. L'analyse s'effectue uniquement sur l'ensemble des résultats de simulation obtenus, et ne nécessite ainsi aucune connaissance sur le modèle hormis la valeur des points évalués. L'inconvénient majeur de cette approche est la lourdeur des temps de calcul.

À l'inverse, les méthodes **internes** se caractérisent par un fort degré d'intrusion dans le code de calcul et un temps d'implémentation forcément plus important mais elles présentent l'avantage de nécessiter peu de temps de calcul. Dans le cas des méthodes ensemblistes, les incertitudes sont décrites par des supports bornés (le plus souvent des intervalles) puis propagées en une seule simulation grâce à l'analyse par intervalle (Moore et al. 1979; Neumaier 1990), dont le principe est de calculer l'image d'un intervalle par le modèle. Un des inconvénients majeurs des approches ensemblistes est qu'elles exigent une écriture particulière et soigneuse des équations du modèle.

Dans le cadre de ces travaux de thèse, seules les méthodes mathématiques dites externes ont été étudiées, principalement pour leur aspect non intrusif. Au regard de la complexité de modèles utilisés, l'utilisation de méthodes internes aurait effectivement nécessité des coûts de développement informatique trop importants.

❖ Choix d'une terminologie

Selon le contexte d'étude, la terminologie employée dans l'utilisation de ces méthodes peut quelque peu différer. Par exemple, en analyse de sensibilité, les facteurs d'entrée peuvent être appelés des **facteurs incertains** dans le cas d'une étude considérant des intervalles d'incertitude sur ces facteurs, soit des **facteurs de conception** dans le cas d'une étude considérant des intervalles de variation en conception.

Pour éviter de rendre confus la présentation de ces méthodes, nous faisons le choix de n'employer qu'une seule terminologie dans cette section, celle propre aux études en contexte incertain. Par la suite, la terminologie sera adaptée en fonction du contexte d'application.

❖ Notations

Soit x le vecteur incluant l'ensemble des facteurs d'entrée étudiés d'un modèle $\mathcal{F}$ tel que $x = (x_1, \dots, x_d)$, avec d le nombre de ces facteurs.

Soit $y = \mathcal{F}(x)$ le vecteur des variables d'intérêt du modèle $\mathcal{F}$ obtenu pour une valeur de x donnée.

Soit z le vecteur des variables d'intérêt du modèle $\mathcal{F}$ obtenu pour une valeur de x donnée. Le vecteur z résulte directement des sorties de $\mathcal{F}$, et peut s'écrire $z = \mathcal{G}(y)$, avec $\mathcal{G}$ la fonction permettant de construire z à partir de y . Pour simplifier la présentation des méthodes d'ASAI, z sera dans un premier temps confondu avec y . La distinction sera faite dans un second temps, lors de la partie applicative (partie 2.3).

L'incertitude associée à une quantité donnée est souvent décrite à l'aide d'une distribution de probabilité. Pour la suite, $\mathbb{P}r(x)$ est défini comme la densité de probabilité du vecteur x , $\mathbb{P}r(y)$ celle de y , et $\mathbb{P}r(z)$ celle de z .

❖ Relation incertitude/sensibilité

Avant de distinguer précisément une analyse d'incertitude d'une analyse de sensibilité, Chouquet (2007) propose une illustration Figure 2-1 permettant d'appréhender le lien entre incertitude en entrée, sensibilité du modèle, et incertitude en sortie :

- cas n°1 : malgré une incertitude forte sur le facteur d'entrée considéré, l'incertitude qui en résulte en sortie est faible. Le modèle est alors dit peu sensible à ce facteur, ou le facteur dit peu influent ;
- cas n°2 : alors que ce facteur est moins incertain que le précédent, le modèle $\mathcal{F}$ est davantage sensible, ce qui entraîne une incertitude plus forte en sortie. Le facteur est ici influent ;
- cas n°3 : assez naturellement, à sensibilité égale du modèle, si l'incertitude sur l'entrée diminue, l'incertitude sur la sortie diminue aussi.

Ainsi, peu importe la sensibilité du modèle à un paramètre si tant est qu'il est parfaitement connu, et à l'inverse, si un facteur est peu influent sur un modèle, il n'est pas nécessaire de travailler à réduire l'incertitude qui l'entoure.

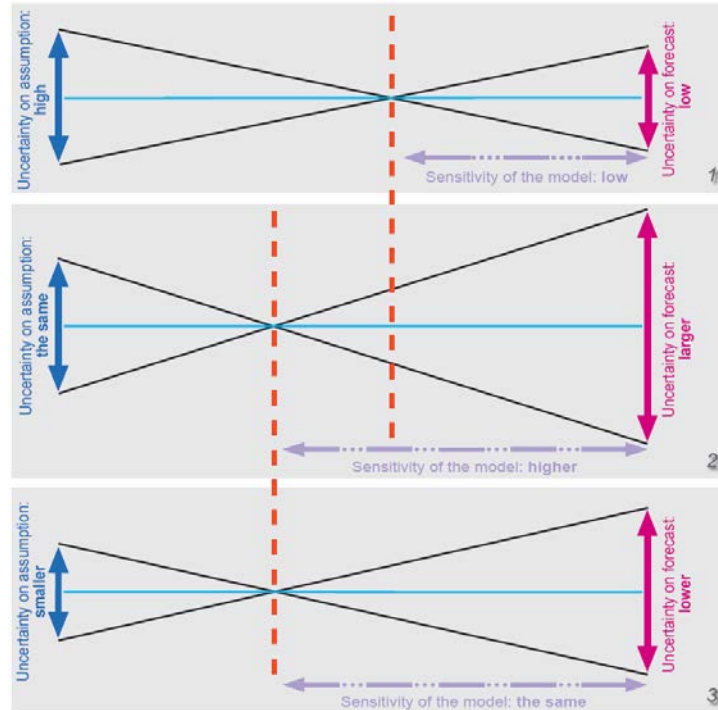


Figure 2-1. Lien entre incertitude en entrée, sensibilité du modèle et incertitude en sortie, tirée de Chouquet (2007)

Les analyses de sensibilité et d'incertitude poursuivent des buts différents mais sont tout à fait complémentaires. Les deux paragraphes suivants décrivent ces démarches avec leurs principales étapes de mise en œuvre.

2.2.2. Analyse d'incertitude

2.2.2.1. PRINCIPE D'UNE ANALYSE D'INCERTITUDE

Le principe d'une analyse d'incertitude (AI) est d'évaluer le niveau d'incertitude des prédictions d'un modèle au regard d'incertitudes pesant sur les facteurs d'entrée de ce modèle. Plus précisément, l'AI vise à déterminer la distribution de probabilité $\mathbb{P}r(y)$ consécutive à celle des facteurs d'entrée $\mathbb{P}r(x)$. L'enjeu est de pouvoir propager les incertitudes sur x à travers le modèle, de manière à mesurer le degré d'incertitude sur $\mathcal{F}(x)$.

Une illustration est donnée à la Figure 2-2 pour un modèle $\mathcal{F}$ à deux entrées $x = (x_1, x_2)$. Un profil d'incertitude est défini pour x_1 et x_2 (en bleu) et l'objectif est de déterminer le profil d'incertitude de $\mathcal{F}(x)$ (en vert).

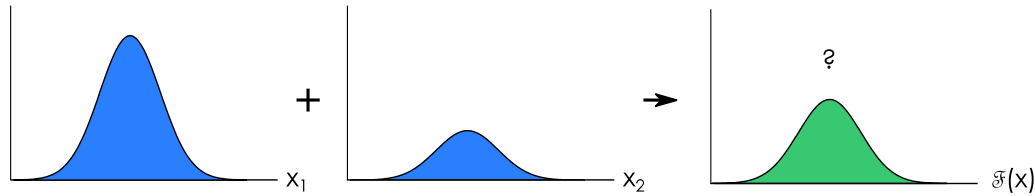


Figure 2-2 : Illustration du principe de l'analyse d'incertitude, d'après Makowski (2014)

L'analyse d'incertitude permet au modélisateur ou à l'utilisateur d'un modèle de disposer d'informations au sujet du degré de fiabilité des prédictions du modèle. Ces informations peuvent également permettre d'optimiser des variables décisionnelles (Faivre et al. 2013).

La question suivante pourrait par exemple être traitée grâce à l'AI : quelle est la probabilité que la consommation prévisionnelle d'un bâtiment dépasse un certain seuil, au regard des incertitudes pesant sur les facteurs d'entrée du modèle de simulation ?

2.2.2.2. PRINCIPALES APPROCHES EN ANALYSE D'INCERTITUDE

En pratique, les modèles actuels sont bien trop complexes et sophistiqués pour rendre la détermination de $\mathbb{P}r(y)$ possible par des calculs analytiques. Il convient alors d'avoir recours à des méthodes d'estimation de cette probabilité de distribution, pouvant être classées selon quatre grandes approches.

L'approche **différentielle**, approche classique utilisée par exemple en métrologie mais réservée au cas où le résultat attendu de l'analyse est une mesure d'incertitude (variance), et non un quantile ou une probabilité de dépassement de seuil. Dans le cas de facteurs indépendants, elle exploite les dérivées partielles de $\mathcal{F}$ par rapport aux facteurs (Saltelli et al. 2000) et les incertitudes sur les facteurs. Des termes de covariance sont à ajouter dans le cas de facteurs d'entrée non-interdépendants.

L'approche par **optimisation min/max**, où le problème de propagation des incertitudes est converti en deux problèmes d'optimisation successifs. Le premier a pour objectif de minimiser $\mathcal{F}(x)$ en faisant varier x dans son domaine d'incertitude $\mathbb{P}r(x)$, et le second a l'objectif opposé, à savoir maximiser $\mathcal{F}(x)$ dans les mêmes conditions. De nombreux algorithmes permettent cette résolution, qu'ils soient déterministes (Duret et al. 2006) ou stochastiques.

L'approche **ensembliste**, basée sur l'arithmétique des intervalles (Moore et al. 1979; Neumaier 1990). Ces méthodes, déjà présentées en section 2.2.1, sont des méthodes internes. Elles peuvent être très lourdes à mettre en œuvre sur des modèles numériques complexes mais présentent comme principal avantage de ne nécessiter qu'une seule simulation.

L'approche **probabiliste** utilise une technique d'échantillonnage dans $\mathbb{P}r(x)$ pour reconstituer $\mathbb{P}r(y)$ par analyse statistique, à partir de la simulation d'un échantillon de taille suffisamment élevée, généré par des méthodes de Monte-Carlo ou de quasi Monte-Carlo (McKay et al. 2000), détaillées ultérieurement (§ 2.2.2.3). Elle offre la possibilité de mener en parallèle au calcul d'incertitude une analyse de sensibilité globale (Saltelli et al. 2000). Il s'agit de l'approche retenue dans ces travaux. En effet, malgré le nombre important de simulations requises, cette approche est reconnue pour sa généralité et sa facilité d'implémentation. De plus, les temps de calcul peuvent être réduits car les simulations peuvent être parallélisées. Elle est décrite plus en détails ci-après.

Dans le cadre de l'approche probabiliste, la démarche d'analyse d'incertitude comporte quatre étapes principales :

1. la définition des intervalles de variation et des distributions de probabilité des facteurs incertains ;
2. l'échantillonnage dans les distributions ;
3. les calculs des sorties du modèle ;
4. la description de la distribution des variables d'intérêt.

La définition des intervalles de variation et des distributions de probabilité des facteurs incertains est une étape charnière car les résultats de l'analyse sont intimement liés à la caractérisation de ces incertitudes. Un travail d'investigation approfondi doit être mené. La littérature scientifique, l'avis d'experts, ou le recours à des campagnes de mesures doivent servir à estimer du mieux possible ces distributions. Les lois discrète, uniforme, normale, triangulaire, ou encore log-normale sont les plus couramment utilisées (Macdonald 2002).

L'échantillonnage dans les distributions a pour objectif d'obtenir des distributions stables en sortie tout en conservant des temps de calcul raisonnables. Des choix sont à faire concernant notamment la méthode d'échantillonnage et la taille de l'échantillon.

Les calculs des sorties du modèle correspondent bien souvent à l'étape la plus chronophage d'une AI en approche probabiliste puisque l'ensemble de l'échantillon est à simuler par le modèle. Des métamodèles peuvent être utilisés pour réduire le temps de calcul.

Enfin, **la description de la distribution des variables d'intérêt** représente l'étape d'interprétation des résultats de la propagation d'incertitudes. En fonction des sorties du modèle, les variables d'intérêt de l'étude sont construites,

permettant alors une analyse statistique des résultats (moyenne/variance, quantiles, fonction de distribution cumulée...).

2.2.2.3. TECHNIQUES D'ÉCHANTILLONNAGE EN APPROCHE PROBABILISTE

En approche probabiliste, une grande diversité de méthodes d'échantillonnage existent (Saltelli et al. 2000). Elles peuvent être regroupées en trois familles :

- l'échantillonnage aléatoire (ou pseudo-aléatoire) ;
- l'échantillonnage stratifié ;
- l'échantillonnage quasi-aléatoire.

L'**échantillonnage dit aléatoire (ou pseudo-aléatoire)** est souvent assimilé à la technique de tirage de Monte Carlo pur. Le tirage aléatoire n'étant qu'une procédure informatique mimant la génération d'une suite de nombres aléatoires, il est aussi plus justement appelé tirage pseudo-aléatoire. La vitesse de convergence d'une estimation par la méthode de Monte Carlo est, d'après le théorème central limite, proportionnel à $\frac{1}{\sqrt{N}}$, avec N la taille de l'échantillon. Si cela peut se révéler particulièrement lent, cette convergence est indépendante du nombre de facteurs échantillonnés et de la régularité du modèle $\mathcal{F}$ (Faivre et al. 2013).

L'**échantillonnage stratifié** correspond à une alternative à la méthode de Monte-Carlo, développée dans le but d'accélérer la convergence de certaines estimations (Helton et Davis 2003) mais aussi d'améliorer la couverture de l'espace des facteurs d'entrée. En effet, tirer au hasard des points dans un espace de grande dimension conduit généralement à une mauvaise exploration de certaines dimensions (Faivre et al. 2013). Pour pallier cela, l'échantillonnage stratifié consiste à subdiviser le domaine de chaque facteur d'entrée en p segments de taille fixe ou variable (selon la loi de probabilité du facteur), puis à tirer aléatoirement un point dans chacun de ces segments. Si $p = 1$, un échantillonnage aléatoire est retrouvé. L'échantillonnage par hypercubes latins ou LHS (« *Latin Hypercube Sampling* ») est un cas particulier de l'échantillonnage stratifié dans lequel les segments sont équiprobables (i.e. de probabilité $1/p$). L'échantillonnage par LHS, proposé initialement par McKay et al. (1979), garantit une couverture uniforme du domaine de chaque facteur, pouvant améliorer la vitesse de convergence des estimations, mais introduisant un biais dans ces estimations. La répartition conjointe pour deux ou davantage de facteurs n'est cependant pas considérée dans la méthode LHS classique, au contraire des tableaux orthogonaux (Rao 1947). Il est néanmoins possible de combiner ces deux propriétés intéressantes (Tang 1993).

L'**échantillonnage quasi-aléatoire** utilise des séquences prédéterminées pour remplacer les séquences générées aléatoirement par la méthode de Monte-Carlo (Lemieux 2009). L'objectif est de disposer de meilleures propriétés de convergence sous certaines conditions de régularité (Jacques 2005), même si des motifs peuvent être visibles pour une taille d'échantillon importante. Ces suites reposent sur la notion de discrédance, définie comme la déviation de la répartition des points échantillonnés par rapport à une distribution uniforme. Ce critère est une mesure de la non-uniformité de l'échantillonnage, et permet de construire des suites à faible discrédance, généralement appelés suites de quasi Monte-Carlo. La vitesse de convergence de ces suites est de l'ordre de $\frac{\log(N)^K}{N}$. Des exemples connus de ces suites sont données par Halton (1960), Sobol (1967), Niederreiter (1978), et Faure (1992). Ces suites appartiennent en fait à la catégorie plus large des plans à bon remplissage de l'espace (« *space filling* »), dans laquelle auraient pu être cités les plans basés sur des critères géométriques tels que les critères MaxiMin et MiniMax. Bien qu'intéressants, ces critères de distance, visant respectivement à espacer les points du plan le plus possible les uns des autres et minimiser le volume des zones vides de l'espace, présentent des limites fortes en grande dimension : centre du domaine délaissé pour le critère MaxiMin et méthode d'estimation très coûteuse pour le critère MiniMax.

Enfin, des stratégies hybrides peuvent être développées à partir de ces familles d'échantillonnage. Faivre et al. (2013) soulignent la possibilité d'élaborer des **plans optimisés** à partir de plans LHS initiaux et d'un critère d'intérêt, comme par exemple les plans LHS à faible discrédance (Jin et al. 2005).

Une illustration de ces différents tirages est proposée à la Figure 2-3. Elle est tirée de Munaretto (2014) et prolonge celle réalisée par Jacques (2005) au sujet de la comparaison menée par Homma et Saltelli (1995) entre l'échantillonnage aléatoire et les méthodes LHS et de quasi Monte-Carlo par séquences de Sobol. Les résultats de cette étude ont montré que cette dernière méthode permettait une convergence plus rapide que les deux autres.

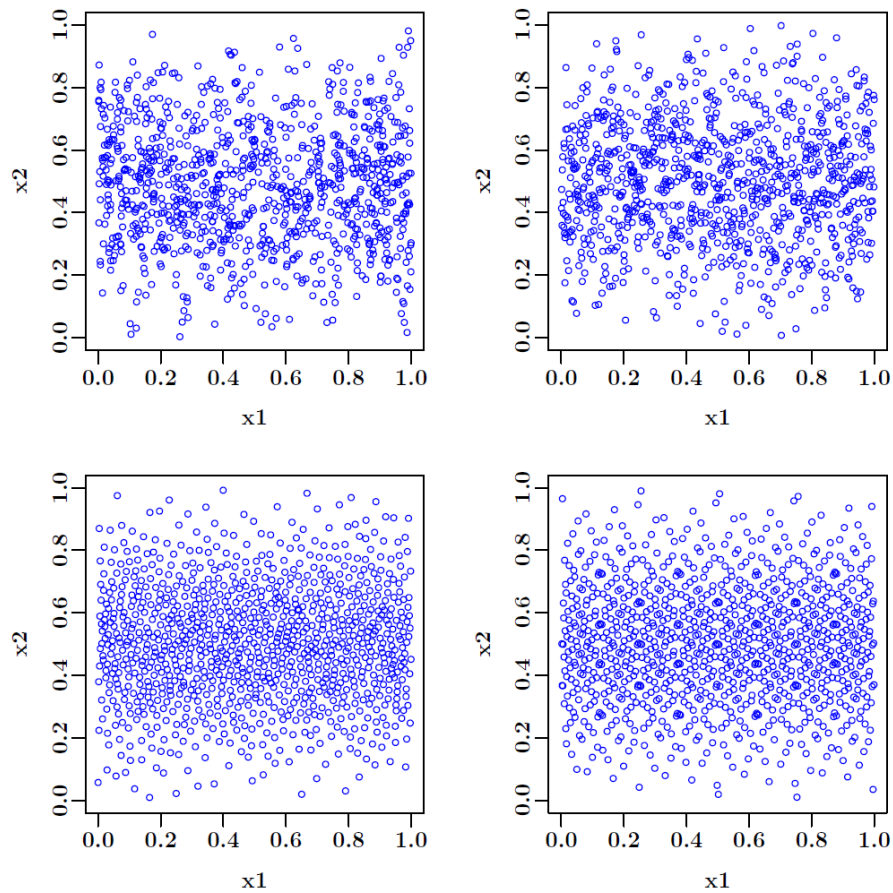


Figure 2-3. Échantillonnage (1000 tirages) de type aléatoire (en haut à gauche), stratifié LHS (en haut à droite), stratifié optimisé par critère MaxiMin (en bas à gauche), quasi-aléatoire par séquences de Sobol (en bas à droite) pour deux facteurs d'entrée (x_1 et x_2) dotés respectivement d'une loi uniforme sur l'intervalle $[0,1]$ et d'une loi normale tronquée sur $[0,1]$ ($\mu = 0,5, \sigma = 0,1$)

2.2.3. Analyse de sensibilité

2.2.3.1. PRINCIPE D'UNE ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Outre la question à laquelle tente de répondre l'analyse d'incertitude, à savoir l'évaluation de l'impact des sources d'incertitudes en entrée sur les variables de sortie d'un modèle, une autre question majeure est de connaître la contribution de chacun des facteurs incertains dans l'incertitude observée en sortie. C'est l'objectif de l'analyse de sensibilité (AS), illustrée Figure 2-4 avec l'exemple donné en section 2.2.2, et dont une définition pourrait être : « *The study of how uncertainty in the output of a model [...] can be apportioned to different sources of uncertainty in the model input* » (Saltelli et al. 2004).



Figure 2-4. Illustration du principe d'une analyse de sensibilité, d'après Makowski (2014)

Ce type d'analyse permet de hiérarchiser les différents facteurs d'entrée étudiés afin d'identifier les plus influents et, inversement, ceux ayant un impact moindre sur les sorties du modèle. L'intérêt pratique pour le concepteur est de pouvoir cibler les principaux leviers de performance, voire d'y concentrer les efforts d'optimisation.

2.2.3.2. PRINCIPALES APPROCHES EN ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Historiquement, les **analyses de sensibilité** sont dites « **locales** » au sens où elles étudient la variation de $y = \mathcal{F}(x)$ induite par une petite variation autour d'une valeur nominale x_0 . Basées sur des calculs de dérivées partielles, elles considèrent la variation d'un seul paramètre à la fois, les autres étant conservés à leur valeur nominale. Leur usage suppose généralement l'existence d'une relation linéaire entre les facteurs d'entrée et la sortie du modèle. Les analyses de sensibilité locale (ASL) permettent au modélisateur d'analyser le comportement d'un modèle autour d'une ou plusieurs valeurs de référence. Lorsque les facteurs étudiés peuvent varier sur un large domaine, ce type d'analyse n'est alors plus adapté. En effet, si l'hypothèse de linéarité peut être considérée comme acceptable pour les modèles non-linéaires lorsque l'impact local d'une petite variation est étudié, cela ne peut plus être le cas lors de l'analyse de l'effet global de la variation d'un facteur sur un domaine étendu. De la même manière, les interactions entre les facteurs d'entrée, non prises en compte dans cette approche, et pouvant être négligées pour de petites variations, posent un problème lorsqu'un domaine d'incertitude important doit être étudié. La notion d'interaction renvoie dans le sens commun à une action réciproque qu'exercent l'un sur l'autre deux ou plusieurs éléments. Dans notre contexte, l'interaction entre deux facteurs d'entrée se traduit par le fait que l'influence d'un facteur sur le modèle est conditionnée par la valeur prise par l'autre facteur, et réciproquement. Ces facteurs interagissant entre eux présentent ainsi une influence combinée sur la ou les sorties du modèle. Un exemple de principe est proposé à la Figure 2-5, dans le cas d'un modèle à deux entrées binaires A et B. Il peut être observé que la réponse du modèle selon les valeurs de A diffère en fonction de la valeur prise par B (lorsque A passe de -1 à 1, la sortie croît davantage quand B vaut 1 au lieu de -1). L'influence du facteur A calculée par

ASL autour du point $(-1; 1)$ serait ainsi plus élevée que celle calculée autour du point $(-1; -1)$. Cet exemple permet d'illustrer l'intérêt d'étudier une variation simultanée des facteurs dans le but de prendre en compte les interactions entre différents facteurs.

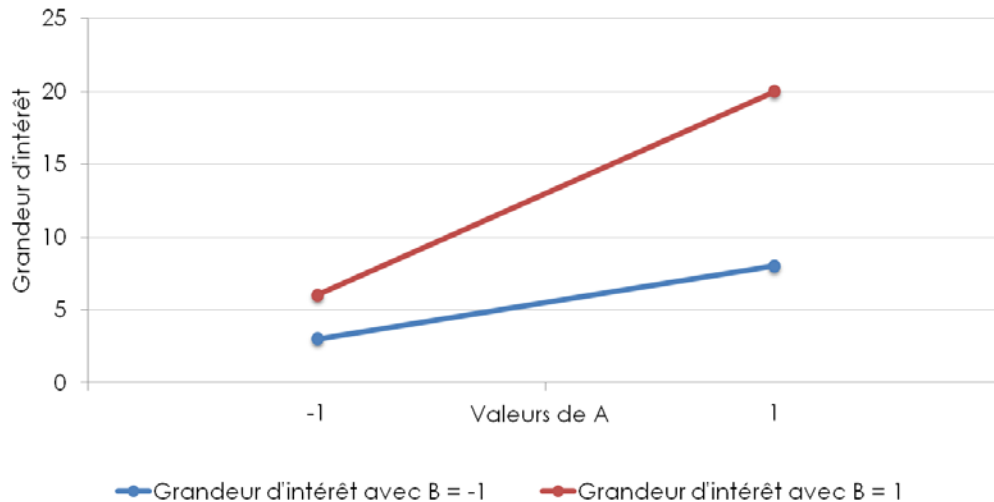


Figure 2-5. Illustration d'une interaction entre deux facteurs incertains A et B

En définitive, si les ASL sont faciles à mettre en place et à interpréter, elles présentent une double limite (hypothèse de linéarité locale, et interactions) qui ont historiquement imposé le développement d'une nouvelle génération de méthodes, appelées les analyses de sensibilité globale (ASG).

A *contrario* des analyses locales, les **analyses de sensibilité globale** étudient la variation de $y = \mathcal{F}(x)$ induite par x sur l'ensemble de son domaine d'incertitude. Ces méthodes sont de plus en plus utilisées, et permettent de répondre à de nombreuses questions pratiques comme par exemple :

- Quel facteur contribue le plus à la variation d'une (des) sortie(s) ?
- Quels facteurs d'entrée sont indésirables (peu d'influence sur les résultats et difficulté d'obtention d'une valeur précise) et peuvent potentiellement être supprimés ou pris en compte par des valeurs par défaut ?
- Quels sont les paramètres d'entrée interdépendants les uns des autres ?

L'influence d'un facteur incertain peut se mesurer par le biais d'indices de sensibilité. Si la valeur de ces indices est haute, le facteur a une forte influence sur la sortie, dans le cas contraire, le modèle est peu sensible à ce facteur d'entrée. Parmi les différents indices disponibles dans la littérature, ceux basés sur la décomposition de la variance (de la variable de sortie) sont jugés particulièrement performants. Sont souvent identifiés (Faivre et al. 2013) :

- **l'indice de sensibilité principal (ou de premier ordre) :**

$$SI(x_i) = \frac{\text{Var}(\mathbb{E}[y|x_i])}{\text{Var}(y)} \quad (2.1)$$

- l'indice de sensibilité total :

$$TSI(x_i) = \frac{\mathbb{E}[\text{Var}(y|x_j, j \neq i)]}{\text{Var}(y)} \quad (2.2)$$

Avec :

- y la réponse du modèle étudié au vecteur aléatoire $x = (x_1, \dots, x_d)$;
- $\mathbb{E}(y)$ l'espérance de y ;
- $\mathbb{E}(y|x_i)$ l'espérance conditionnelle de y sachant x_i ;
- $\text{Var}(y)$ la variance de y ;
- $\text{Var}(y|x_j, j \neq i)$ la variance conditionnelle de y sachant x_j , pour tout $j \in \llbracket 1; d \rrbracket$, avec $j \neq i$.

L'indice principal mesure la variabilité des résultats du modèle moyennés sur les facteurs incertains autres que x_i . Cet indice est une mesure de l'effet principal de x_i . Outre cet effet, l'indice total intègre en plus, l'effet de l'ensemble des interactions du facteur x_i avec tous les autres. Par définition, ces indices sont compris entre 0 et 1, et plus ils sont proches de 1, plus le facteur est influent.

Bien que considérées comme une sous-catégorie des méthodes d'analyse de sensibilité globale (Tian 2013; Faivre et al. 2013), les **méthodes de criblage** pourraient être situées entre les méthodes locales et globales. En effet, elles intègrent bien une exploration sur tout le domaine d'entrée à l'instar des méthodes globales (s'affranchissant ainsi des limitations des méthodes locales) mais elles s'en différencient par une évaluation quantitative moins précise des sensibilités du modèle aux entrées incertaines en contrepartie de coûts plus modérés en temps de calcul.

Dans la suite de ces travaux, nous excluons les analyses de sensibilité locale pour plusieurs raisons. Tout d'abord, de nombreuses interactions sont en jeu dans les modèles de simulation thermique dynamique de bâtiment et d'analyse de cycle de vie. Citons par exemple, le rendement de l'échangeur thermique d'une ventilation double-flux et le débit de renouvellement d'air imposé. Si le débit est nul, le rendement de l'échangeur n'a aucune influence sur la consommation peu importe sa valeur à l'inverse d'un scénario où des débits conséquents seraient imposés. Enfin, contrairement au contexte incertain, les plages de variation des facteurs d'entrée sont généralement larges en conception. Or les ASL permettent une étude localisée autour d'une valeur de référence, les rendant inadaptées à ce contexte.

2.2.3.3. PRINCIPALES ÉTAPES D'UNE ANALYSE DE SENSIBILITÉ GLOBALE

Les principales étapes de fonctionnement d'une analyse de sensibilité globale sont :

1. la définition des intervalles de variation et des distributions de probabilité des facteurs incertains ;
2. l'échantillonnage dans les distributions ;
3. les calculs des sorties du modèle ;
4. le calcul des indices de sensibilité.

Cette démarche reprend les trois premières étapes de la propagation d'incertitudes, et se distingue par une quatrième et dernière étape spécifique à l'ASG dont l'objectif est d'estimer la valeur d'indices de sensibilité. Une analyse de sensibilité globale peut donc généralement se mener en parallèle d'une propagation d'incertitudes, même si elle peut nécessiter d'effectuer davantage d'appels au modèle, notamment en grande dimension.

Les méthodes de criblage partagent ces étapes principales de fonctionnement. En revanche, les méthodologies (et en particulier les techniques d'échantillonnage) qu'elles emploient ne sont pas adaptées pour permettre d'obtenir une distribution des variables de sortie satisfaisante pour le calcul de mesures statistiques (moyenne, variance, quantiles, histogramme, fonction de distribution cumulée, etc.).

2.2.3.4. MÉTHODES DE CRIBLAGE ET D'ANALYSE DE SENSIBILITÉ GLOBALE

Sans ambition d'exhaustivité, ce paragraphe vise à réaliser un tour d'horizon des méthodes existantes et à en proposer une description générale, de manière à fournir les clés de compréhension permettant de justifier les choix réalisés dans la partie 2.3.

❖ **Panorama général des méthodes existantes**

De nombreuses méthodes de criblage et d'analyse de sensibilité globale existent, présentant chacune des avantages et des inconvénients qu'il convient de peser au regard du problème à étudier, des informations à obtenir grâce à l'AS, de la complexité du modèle, du nombre de facteurs d'entrée, et des capacités de calculs. Iooss (2011) positionne un panel de méthodes dans un diagramme composé de deux axes : la complexité/régularité du modèle vis-à-vis du nombre d'évaluations du modèle. Ce diagramme est présenté à la Figure 2-6, avec d le nombre de facteurs d'entrée étudiés.

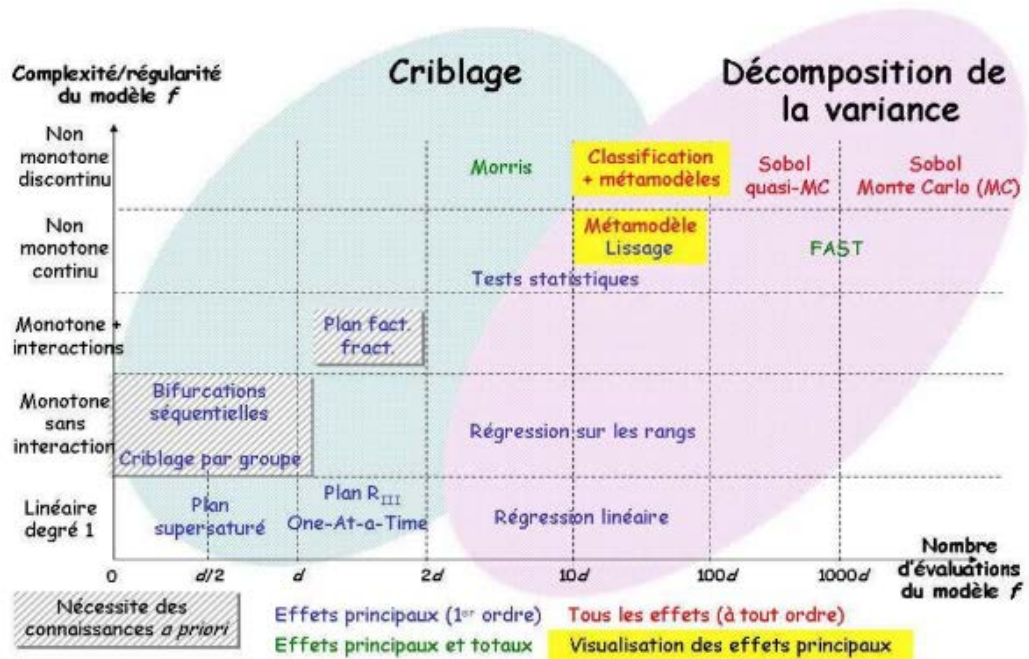


Figure 2-6. Synthèse détaillée des méthodes d'AS, tirée de Iooss (2011)

De manière générale, plus l'analyse du comportement du modèle se veut fine, plus le coût en matière de temps de calcul sera important. Ce coût dépend plus ou moins linéairement du nombre d de facteurs d'entrée. Deux groupes de méthodes peuvent y être distingués : les méthodes de criblage, utilisées pour l'identification des paramètres d'entrée influents parmi un grand nombre de paramètres, et les méthodes basées sur la décomposition de la variance qui permettent de hiérarchiser de façon précise l'influence des entrées sur la variabilité observée en sortie. La richesse de cette grille de sélection réside dans ses différents niveaux de lecture. Un code couleur permet en effet de visualiser le type d'informations fournies (effets principaux, totaux...) par chaque méthode, qu'il convient de mettre en lien, d'une part avec la connaissance *a priori* nécessaire sur les propriétés du modèle (monotonie, linéarité, etc.), et d'autre part avec le nombre d'évaluations requis.

Nous proposons ci-après de présenter quelques méthodes appartenant aux deux grandes catégories identifiées.

❖ Méthodes de criblage

Dans les méthodes de criblage à proprement parler, trois classes peuvent être distinguées (Faivre et al. 2013) : le criblage à très grande dimension ou « super criblage » selon Iooss (2015), les plans d'expérience classiques et la méthode de Morris.

Dans la première classe, les techniques existantes permettent de réaliser un criblage en moins de calculs qu'il n'y a d'entrée (elles sont donc particulièrement

adaptées aux modèles possédant plusieurs dizaines voire centaines d'entrée). En contrepartie de ce faible nombre d'appels au modèle, celles-ci supposent à la fois des connaissances *a priori* sur les propriétés du modèle (monotonie, sens de variation) et sur les facteurs d'entrée (absence d'interactions, nombre de facteurs influents faible sur le nombre total de facteurs). Ces fortes hypothèses rendent ces techniques difficilement praticables pour les modèles utilisés dans notre cas d'application.

La seconde classe correspond aux méthodes issues de la théorie classique des plans d'expérience (Montgomery 2008). Parmi ces plans, le plan factoriel complet repose sur l'évaluation de toutes les combinaisons possibles entre les niveaux (discretisés) des facteurs d'entrée, soit 2^d dans le cas d'un modèle monotone à deux niveaux par entrée. S'il permet d'estimer les effets de toutes les entrées et de leurs interactions, il devient impraticable au delà d'une dizaine d'entrées en raison du nombre trop grand de simulations requises. En supposant les effets des interactions nuls, les plans de résolution trois (RIII) requièrent *a minima* $d + 1$ calculs, soit nettement moins que le plan factoriel complet. Le plan OAT (« *One At a Time* ») reste le plus utilisé d'entre eux malgré des déficiences identifiées (Saltelli et Annoni 2010). Les plans orthogonaux (*i.e.* les plans P vérifiant $P \cdot {}^tP = I$) ou ceux de résolution quatre (RIV), apparaissent davantage adaptés pour l'analyse de sensibilité. Parmi les plans orthogonaux, les plans factoriels fractionnaires sont l'une des sous-classes les plus célèbres. Leur construction se base sur la confusion d'effets d'interactions et d'effets principaux, appelés alias (Droesbeke et al. 1997). Les plans de résolution quatre permettent quant à eux une estimation non biaisée des effets principaux des facteurs d'entrée dans le cas de modèles avec interactions.

La méthode de Morris se base sur la répétition de plans OAT aléatoirement choisis. Elle est plus coûteuse en temps de calcul mais nécessite moins d'hypothèses sur le modèle que les deux premières classes de méthodes. Cette méthode permet une prise en compte des interactions, et distingue les facteurs d'entrée en trois catégories (Figure 2-7) :

- les facteurs ayant des effets négligeables (groupe n°1) ;
- les facteurs ayant des effets majoritairement linéaires (groupe n°2) ;
- les facteurs ayant des effets non linéaires et/ou avec interactions (groupe n°3).

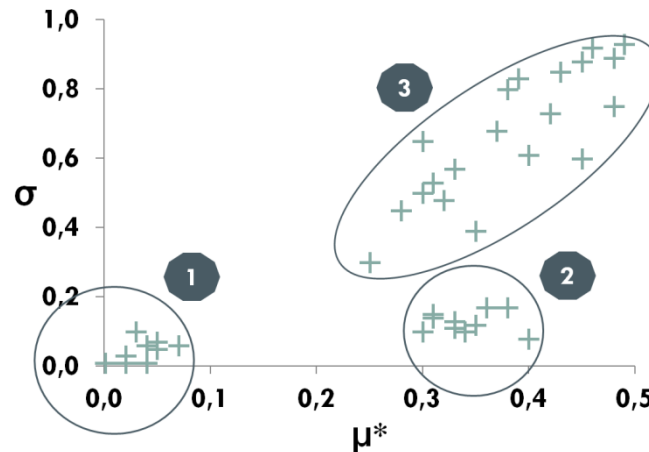


Figure 2-7. Exemple des trois catégories de facteurs pouvant être identifiées avec la méthode de Morris, d'après Iooss (2009)

Cette méthode, apparaissant comme pertinente dans le cadre de ces travaux, sera détaillée au paragraphe 2.3.4.2, et son utilisation justifiée.

❖ Méthodes d'analyse de sensibilité globale

À l'inverse des méthodes de criblage, visant essentiellement à séparer les facteurs influents des autres, les méthodes d'analyse de sensibilité globale ont pour but d'estimer de manière quantitative, par le biais d'indices de sensibilité, la contribution de chaque facteur d'entrée sur la variabilité de la sortie du modèle. (Faivre et al. 2013) distinguent trois premières classes de méthodes (celles basées sur la régression linéaire, celles exploitant des tests statistiques, et celles reposant sur la décomposition de la variance fonctionnelle) auxquelles s'ajoutent deux autres classes se fondant sur une approximation du modèle numérique (à savoir les méthodes de lissage et les métamodèles).

La classe des **méthodes basées sur la régression linéaire** permettent de calculer différents indices de sensibilité lorsque le modèle présente un comportement relativement linéaire vis-à-vis des facteurs d'entrée étudiés. Une étape préalable d'échantillonnage est nécessaire sur laquelle des outils statistiques classiques sont mis en œuvre pour vérifier l'hypothèse de linéarité, comme par exemple le coefficient de détermination R^2 ou le coefficient de prédictivité Q^2 . Si tel est le cas, les indices suivants peuvent être calculés :

- le coefficient de corrélation linéaire (ou coefficient de Pearson) ;
- le coefficient de régression standard (SRC) ;
- le coefficient de corrélation partielle (PCC).

Ces indices sont faciles à implémenter, relativement peu coûteux en temps de calcul et intuitifs. Néanmoins, plus la part de variabilité de la sortie non expliquée par une relation linéaire est élevée, plus la légitimité de calculer ces indices est discutable, et leurs valeurs trompeuses. En cas de non-linéarité mais a

minima de monotonie, d'autres indices peuvent tout de même être calculés, tels que :

- le coefficient de corrélation sur les rangs (ou coefficient de Spearman) ;
- le coefficient de régression standard sur les rangs (noté SRRC) ;
- le coefficient de corrélation partielle sur les rangs (noté PRCC).

La classe des **méthodes utilisant des tests statistiques** consiste à générer partir d'un échantillonnage de type Monte-Carlo (*i.e.* sans biais dans la distribution), une partition de q sous-échantillons équiprobables pour chaque entrée, et enfin à appliquer des tests statistiques sur ces q sous-échantillons, avec $q \in \mathbb{N}^*$: par exemple, les moyennes communes (CMN) basées sur un test de Fisher ou les médianes communes (CMD) basées sur un test du khi-deux (Faivre et al. 2013). Si ces méthodes ne requièrent pas de monotonie sur le comportement du modèle, elles sont peu intuitives par rapport aux méthodes de régression auxquelles elles sont complémentaires, ce qui explique vraisemblablement leur utilisation peu fréquente en analyse de sensibilité, au moins dans la communauté du bâtiment.

La classe des **méthodes basées sur la décomposition de la variance fonctionnelle** s'applique à des fonctions $\mathcal{F}$ de carré intégrable, sans hypothèses de linéarité ou de monotonie. Si les facteurs d'entrée sont indépendants, (Sobol 1993) a prouvé que $\mathcal{F}$ admet une décomposition unique en somme de fonctions élémentaires permettant d'exprimer la variance de la sortie y sous la forme décomposée d'une somme de $2^d - 1$ termes. À partir de cette décomposition de la variance fonctionnelle, appelée également représentation ANOVA (« *ANalysis Of Variance* ») fonctionnelle, peuvent s'obtenir les indices dits de Sobol, représentant la responsabilité de chaque facteur et des interactions entre les facteurs en matière de pourcentage de la variance expliquée. Afin de ne pas alourdir ce tour d'horizon des méthodes d'AS existantes, les détails théoriques et les expressions de la décomposition et des indices de Sobol sont présentés dans le paragraphe 2.3.4.4. Le propos ici est de pouvoir introduire deux types de méthodes ayant été développés pour estimer ces indices :

- celles basées sur des échantillons Monte-Carlo (Sobol 1993 ; Saltelli 2002) ;
- et celles basées sur une transformée de Fourier multidimensionnelle de $\mathcal{F}$ (Cukier et al. 1978).

Le premier type de méthodes exploite les méthodes d'échantillonnage probabilistes décrites pour l'analyse d'incertitudes. Leur principal inconvénient concerne le taux de convergence en $\sqrt{N}$ (où N est la taille de l'échantillon) des estimateurs des indices de sensibilité, nécessitant un nombre d'appels au modèle pouvant être prohibitif. Les séquences prédéterminées de type quasi-aléatoire permettent néanmoins de réduire généralement d'un facteur 10 le coût des estimations (Saltelli et al. 2008).

Le second type de méthodes, regroupées sous l'acronyme FAST (« *Fourier Amplitude Sensitivity Test* »), permet une estimation relativement fine des indices pour un coût nettement moindre (Faivre et al. 2013). Saltelli et al. (1999) ont proposé une extension pour estimer les indices totaux, même si elle semble mal adaptée lorsque la dimension des entrées s'élève (Tissot et Prieur 2012). D'autres extensions ont été développées comme par exemple la méthode RBD-FAST (« *Random Balance Design* ») (Tarantola et al. 2006).

À la différence des trois premières classes de méthodes, les méthodes de lissage et les métamodèles consistent en une approximation du modèle numérique dans le but d'estimer à faible coût ses sensibilités mais également de permettre une visualisation plus fine des effets du modèle.

Méthodes de lissage

En analyse de sensibilité, les méthodes de lissage ont pour objectif d'étudier les influences de y à ses facteurs d'entrée x_i le long de leur domaine de variation, et non plus à résumer ces influences de manière globale, sous la forme d'un scalaire. Si des graphiques de dispersion en permettent une analyse visuelle mais subjective, les techniques de lissage exploitent des méthodes de régression non paramétrique (Hastie et Tibshirani 1990) pour estimer le plus souvent des espérances conditionnelles permettant d'obtenir une visualisation (ou un graphe) des effets principaux et des interactions d'ordre 1. Parmi les méthodes de lissage, (Faivre et al. 2013) citent les moyennes mobiles, les méthodes à noyaux, les polynômes locaux, et les splines de lissage, suggérant également la revue de Storlie et Helton (2008) pour davantage de détails. À partir de la modélisation de ces espérances conditionnelles, les indices de Sobol d'ordre un, deux voire éventuellement d'ordres supérieurs peuvent facilement être estimés par échantillonnage.

Un autre moyen d'explorer un modèle est d'en construire un **métamodèle**, également appelé surface de réponse, ou modèle simplifié. Il s'agit d'un modèle mathématique présentant un caractère prédictif dégradé mais proche du code étudié, et dont le temps de calcul est négligeable (Downing et al. 1985). Sa construction repose sur un échantillon d'apprentissage calculé à partir du modèle originel. Le nombre de simulations requis dépend de différents aspects : complexité du code d'origine, futur contexte d'utilisation du métamodèle, qualité d'approximation désirée, nombre de facteurs, etc. Le principe est alors d'ajuster les paramètres du métamodèle choisi pour correspondre au mieux aux résultats des simulations issues de l'échantillon. De nombreux métamodèles existent, parmi eux : les polynômes, les splines, les processus gaussiens (aussi connus sous le nom de métamodèles de krigeage), les réseaux de neurones, etc. (Simpson et al. 2001). L'un des enjeux majeurs est de disposer d'un métamodèle

avec une fidélité de prédiction satisfaisante, et sur un domaine de variation relativement large, pour pouvoir l'utiliser dans des études diverses.

❖ Diagramme de décision

Dans cet ensemble riche de méthodes d'analyse de sensibilité, le choix d'une méthode est une opération délicate, chacune présentant des avantages et des inconvénients. Si d'une manière générale, il est conseillé de débiter avec des méthodes simples et de progressivement raffiner l'étude avec l'utilisation de méthodes plus complexes, des synoptiques de décision existent et peuvent assister le modélisateur dans son choix. looss (2011) reprend par exemple le diagramme de décision de Rocquigny et al. (2008), présenté Figure 2.8 et permettant de proposer des grandes directions selon les propriétés mathématiques du modèle, le nombre de facteurs d'entrée étudiés et le coût de calcul. Il convient néanmoins de conserver une relative prudence vis-à-vis de ces diagrammes schématiques, pouvant être réducteurs sur certains aspects.

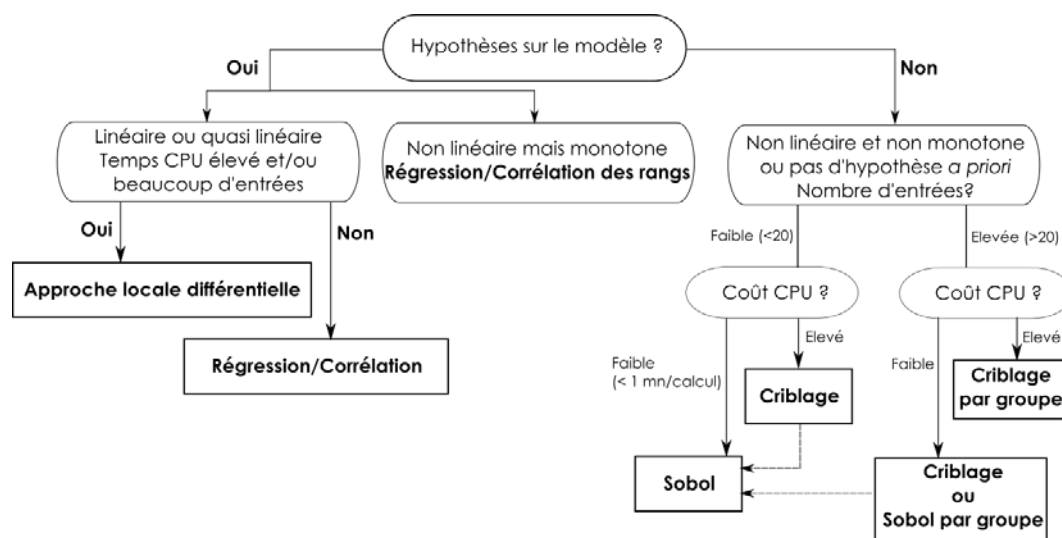


Figure 2.8 : Diagramme de décision pour le choix de la méthode d'analyse de sensibilité appropriée Rocquigny et al. (2008)

2.2.4. Fiabilité des modèles

En permettant d'explorer un modèle pour mieux en appréhender le comportement, les méthodes d'ASAI sont en lien étroit avec la fiabilité des modèles, problématique importante et inhérente à l'utilisation de tout modèle. Dans cette section, un point concis de ce sujet est proposé, appliqué au domaine du bâtiment.

2.2.4.1. LA SIMULATION NUMÉRIQUE : UN OUTIL DEVENU INCONTOURNABLE

La simulation numérique a pour but de reproduire, par le biais de modèles informatiques, des phénomènes physiques réels, et le plus souvent complexes. Elle est utilisée dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, la mécanique, l'agronomie, la météorologie, et bien d'autres, et permet d'étudier l'état, le fonctionnement et l'évolution du système modélisé. Apparu dans les années 1980 avec l'informatisation de la modélisation énergétique des bâtiments, le recours à des outils de simulation thermique dynamique est progressivement devenu incontournable dans le processus de conception d'un projet de construction neuve ou de réhabilitation. Ces outils offrent en effet la possibilité d'évaluer différentes variantes au regard de la performance énergétique et du confort des occupants, constituant ainsi une aide à la décision majeure pour les bureaux d'études, les architectes et les entreprises du secteur. Plus récemment, des outils de simulation du cycle de vie ont également émergés, permettant de compléter l'évaluation des bâtiments à la dimension environnementale. Comme déjà évoqué en 1.3.1, leur utilisation est aujourd'hui systématique dans les bureaux d'études. Néanmoins, il est bien souvent constaté des écarts entre performance mesurée en exploitation et performance estimée lors de la phase de conception.

2.2.4.2. SOURCES D'ERREURS DANS LES MODÈLES NUMÉRIQUES

En effet, pour reprendre le philosophe et scientifique Alfred Korzybski, « une carte n'est pas le territoire », et ici, un modèle n'est qu'une représentation partielle et simplifiée d'une réalité non figée, en évolution permanente, et dont la complexité dépasse notre besoin de compréhension et/ou de représentation du système étudié pour une utilisation donnée.

Pour parvenir à un code informatique, plusieurs niveaux de simplification sont effectivement à opérer. Dans un processus de modélisation, l'objet réel initial est tout d'abord transformé en un objet technologique, avec une description adaptée d'attributs pour répondre aux objectifs de l'étude. De même, les phénomènes physiques considérés comme pertinents pour l'étude du système sont également à spécifier, avec les lois qui les régissent. L'ensemble est alors traduit par un modèle mathématique composé d'équations, lui-même converti en un modèle numérique et algorithmique pour sa résolution. Chacun de ces niveaux de simplification est susceptible d'introduire des biais dans les modèles informatiques, via par exemple des phénomènes physiques ignorés, des hypothèses de modélisation inadéquates, des simplifications des lois de transfert, un choix de discrétisation trop grossier, une résolution numérique imprécise, une précision finie de l'ordinateur ou encore des erreurs de programmation dans l'implémentation informatique du code. D'après Spitz (2012), les biais les plus significatifs interviennent lors des simplifications technologique et physique de

l'objet réel, ceux relevant des transformations mathématique et numérique sont davantage maîtrisés, et souvent facilement identifiés, évalués et corrigés. Selon Neymark et al. (2002), ces sources d'erreur entre simulation et réalité peuvent être qualifiées d'**erreurs internes**. Les erreurs internes (sous-entendu internes au modèle) correspondent aux imperfections du modèle à représenter la réalité, même si une connaissance parfaite de toutes les informations nécessaires pour représenter parfaitement cette réalité était disponible.

À l'opposé, les **erreurs externes** (au modèle) correspondent à une connaissance imparfaite de toutes les informations nécessaires pour représenter parfaitement la réalité, même si un modèle parfait était disponible. Neymark et al. (2002) en citent quatre types :

- Les différences entre les données météorologiques utilisées en simulation, et le microclimat réel auquel est soumis le bâtiment.
- Les différences entre les scénarios considérés par le modélisateur (stratégies de contrôle, effets du comportement des occupants, etc.) et ceux qui se produisent réellement.
- Les différences entre les propriétés physiques (thermiques, optiques, etc.) du bâtiment (et des systèmes de CVC) renseignées lors de la simulation, et celles réellement effectives.
- Les erreurs de saisie du modélisateur.

Une partie de ces différences peut provenir de modifications du projet évalué en conception lors des phases de réalisation et de mise en service du bâtiment. Il peut aussi être noté que les deux premiers types ont trait à une variabilité de certains facteurs d'entrée du modèle (conditions météorologiques ou scénarios d'occupation) alors que le troisième type concerne une incertitude (pesant le plus souvent sur des facteurs statiques).

Pour davantage de détails, le lecteur pourra par exemple se référer à la thèse de Macdonald (2002), qui a entre autres quantifié l'incertitude sur différentes propriétés thermo physiques de matériaux, mais aussi sur les apports de chaleur internes (équipements et occupation) et les infiltrations d'air. Au niveau national, la thèse de Bontemps (2015) présente les principales hypothèses simplificatrices dans les codes de simulation thermique, identifiées dans le cadre du projet ANR FIABILITE⁵².

Pour les outils d'analyse de cycle de vie, la problématique est similaire, avec entre autres des incertitudes sur les bases de données environnementales ou des hypothèses fortes en simulation comme par exemple le choix de la durée de vie du bâtiment ou du mix énergétique, étudiés et identifiés comme paramètres influents par Pannier et al. (2016b).

⁵² <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-10-HABI-0004>

L'ensemble de ces sources d'erreur justifie le souhait des utilisateurs de connaître la précision de leurs outils, et de savoir si cela pourrait remettre en question les choix réalisés en conception. Pour évaluer la fiabilité des outils, des démarches de validation existent.

2.2.4.3. DÉMARCHES DE VALIDATION DE MODÈLES NUMÉRIQUES

❖ Définition de validation

La validation est une démarche dont le but est de s'assurer qu'une simulation, associée au modèle dont elle se sert, fournisse une prédiction satisfaisante sur l'objet réel étudié pour remplir les besoins d'une utilisation donnée. Au-delà de ce domaine d'emploi donné, la démarche n'est plus valable, et le modèle est à requestionner. Comme le signalent Del Barrio et Guyon (2003), le terme de validation doit ainsi être utilisé avec précaution. En effet, *« un code de simulation d'analyse énergétique des bâtiments contient littéralement des centaines de variables, paramètres et autres algorithmes. Idéalement, valider un programme dans son intégralité impliquerait de tester chaque algorithme de manière isolée et de combiner chaque paramètre avec des intervalles raisonnables. Cela serait démesurément coûteux et chronophage. [...] C'est pourquoi les cas d'études impliquant un processus de validation doivent être sélectionnés avec la plus grande attention, et les tests de validation séquencés de manière à obtenir le plus d'informations pour le moindre coût en matière de temps et de ressources. »* (Judkoff et al. 2008).

❖ Les types de processus validation existants

D'après Strachan et al. (2008), trois principaux processus de validation existent :

- la validation analytique ;
- la validation numérique ;
- et la validation empirique.

Une étape préliminaire et commune à tous est cependant à ajouter, consistant à réaliser un examen de départ sur la théorie implémentée dans l'outil et à inspecter le code de manière exhaustive.

La **validation analytique** a pour but de comparer les résultats de sortie d'un modèle aux valeurs de la solution analytique du problème modélisé. Les modèles globaux de bâtiment étant trop complexes pour pouvoir disposer de solutions analytiques, il est néanmoins possible de les décomposer en sous-modèles plus simples offrant, sous d'éventuelles hypothèses simplificatrices, la possibilité d'une résolution analytique. La validité du modèle est ainsi étudiée en isolant des briques élémentaires (p. ex. des phénomènes de transfert), parfois simplifiées (Xiao 2006). Bien entendu, cette limitation de la complexité du modèle ne

permet pas de généraliser sur sa validité globale, même si plus le nombre de ces vérifications analytiques sera élevé, plus la confiance dans les sous-modèles sera grande, et plus les éventuelles sources d'erreur se situeront à l'interface de ces sous-modèles.

La **validation numérique** consiste, quant à elle, à comparer sur un cas d'étude fictif (dont les caractéristiques ont été préalablement rigoureusement fixées) les résultats de plusieurs outils entre eux, dès lors où une référence analytique n'est plus possible. En fixant *a priori* les facteurs d'entrée, cette approche permet de s'affranchir des incertitudes pesant sur ces derniers, et d'identifier plus facilement les potentiels biais des modèles. Elle est généralement assimilée à la validation par comparaison inter-modèle. Dans ce type de processus, il convient de disposer d'une diversité relativement large d'outils, améliorant la probabilité d'approcher une représentation satisfaisante de l'objet réel. Une comparaison inter-modèle entre uniquement deux outils similaires et faux n'a effectivement que peu de d'intérêt. Tout comme la validation analytique, il est possible de partir de cas simples et contrôlé, et de les raffiner progressivement, de manière à identifier l'origine des erreurs, et les sous-modèles responsables. Ce processus de validation est particulièrement intéressant en matière de rapidité et de coût de mise en place, ainsi que le nombre élevé de combinaisons pouvant être testées.

La **validation empirique** correspond enfin à la comparaison des résultats de simulation avec des résultats expérimentaux issus d'un banc d'essais. Différentes échelles peuvent être étudiées (matériau, paroi, cellule test et bâtiment) et sous des conditions plus ou moins contrôlées (d'une expérience en laboratoire avec un protocole expérimental extrêmement maîtrisé à un bâtiment réel peu instrumenté et soumis à de nombreux aléas). Dans ce type d'approche, le banc d'essais employé, la qualité des mesures, et la précision de description du protocole expérimental sont essentiels. Si c'est le cas, de nombreux enseignements peuvent être tirés d'une validation empirique malgré des difficultés inhérentes à ce type de démarche. D'une part, il est difficile de généraliser les résultats obtenus à d'autres cas, et d'autre part l'interprétation des résultats peut s'avérer délicate. En effet, pour comparer les résultats mesurés et simulés, il convient d'estimer les incertitudes pesant d'un côté sur les appareils d'instrumentation, et de l'autre côté sur les facteurs d'entrée du modèle. Notons enfin que ce processus de validation est souvent cher, long et compliqué à mettre en place, même si c'est le seul permettant une confrontation directe avec la réalité.

Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer aux thèses de Munaretto (2014) et Bontemps (2015), proposant un tableau comparatif entre ces trois types de validation, ainsi de nombreuses références dans lesquelles ces démarches ont été mises en œuvre.

❖ Méthodologies de validation

Parmi les travaux réalisés concernant la méthodologie de validation des modèles de STD figurent deux contributions de référence, à savoir ceux de Judkoff et al. (2008) et ceux de Jensen (1995).

Les **travaux de Judkoff et al. (2008)** datent du début des années 1980, et si un rapport avait été rédigé en 1983 et échangé entre les experts du domaine, il n'a été publié que bien plus tard (en 2008), sans mise à jour. La méthodologie de validation proposée (Figure 2.9) intègre une phase de validation analytique, suivie d'une phase de validation empirique et pour terminer une phase de comparaison inter-modèle. La phase préliminaire d'examen de la théorie et du code est implicitement incluse dans cette méthodologie. À chacune de ces phases, des éventuelles corrections dans le code doivent être effectuées pour passer à la phase suivante. À la fin du processus, le modèle peut être considéré comme valable dans le cadre des cas testés.

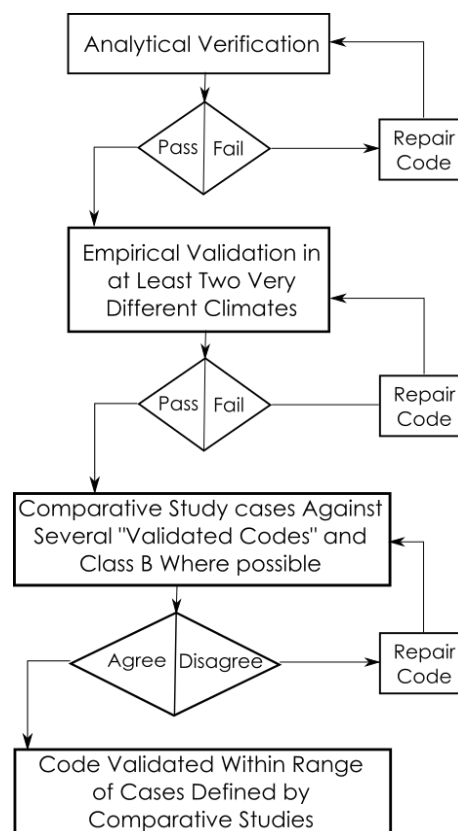


Figure 2.9 : Méthodologie de validation selon Judkoff et al. (2008)

Les **travaux de Jensen (1995)** s'inscrivent dans le cadre du projet européen PASSYS proposé en 1986, dont le but était d'améliorer la fiabilité des codes de simulation concernant les bâtiments vertueux au niveau environnemental, et notamment les systèmes solaires passifs. Une méthodologie globale de validation

a été proposée (Figure 2.10), avec un effort particulier mené sur la validation expérimentale avec le développement de cellules tests dans plusieurs pays européens. Jensen apporte plusieurs éléments complémentaires à l'approche développée par Judkoff et al. (2008), notamment la distinction entre deux échelles de validation (l'échelle d'un sous-modèle élémentaire, et l'échelle du modèle global), l'utilisation d'ASAI pour explorer les modèles et évaluer un degré d'incertitude, et l'intérêt d'associer approches empiriques et non empiriques. En effet, les validations numériques sont relativement rapides et simples à mettre en œuvre, et peuvent permettre d'identifier des biais dans des sous-modèles élémentaires notamment, mais aussi d'alimenter et de servir la définition d'un processus de validation expérimental. La description de la méthodologie proposée par Jensen compte sept étapes, dont les deux premières correspondent à l'examen préliminaire précédemment présenté. Les cinq étapes suivantes consistent en :

- une validation analytique des sous-modèles élémentaires et une validation par comparaison inter-modèle (pour les sous-modèles élémentaires et le modèle globale) ;
- l'utilisation d'analyses de sensibilité (et implicitement d'analyses d'incertitude) pour tester la cohérence et la qualité des sous-modèles et du modèle global, et pour évaluer le degré d'incertitude en sortie au regard des incertitudes pesant sur les facteurs d'entrée ;
- mise en œuvre d'un processus de validation empirique sur les sous-modèles ou le modèle global, et utilisation d'ASAI pour identifier les facteurs les plus importants à maîtriser dans le protocole expérimental et évaluer le niveau d'incertitude global en sortie ;
- l'application d'analyses statistiques afin d'évaluer l'admissibilité des écarts entre mesures et simulations, et en identifier les sources potentielles ;
- la fourniture de recommandations pour améliorer l'outil informatique.

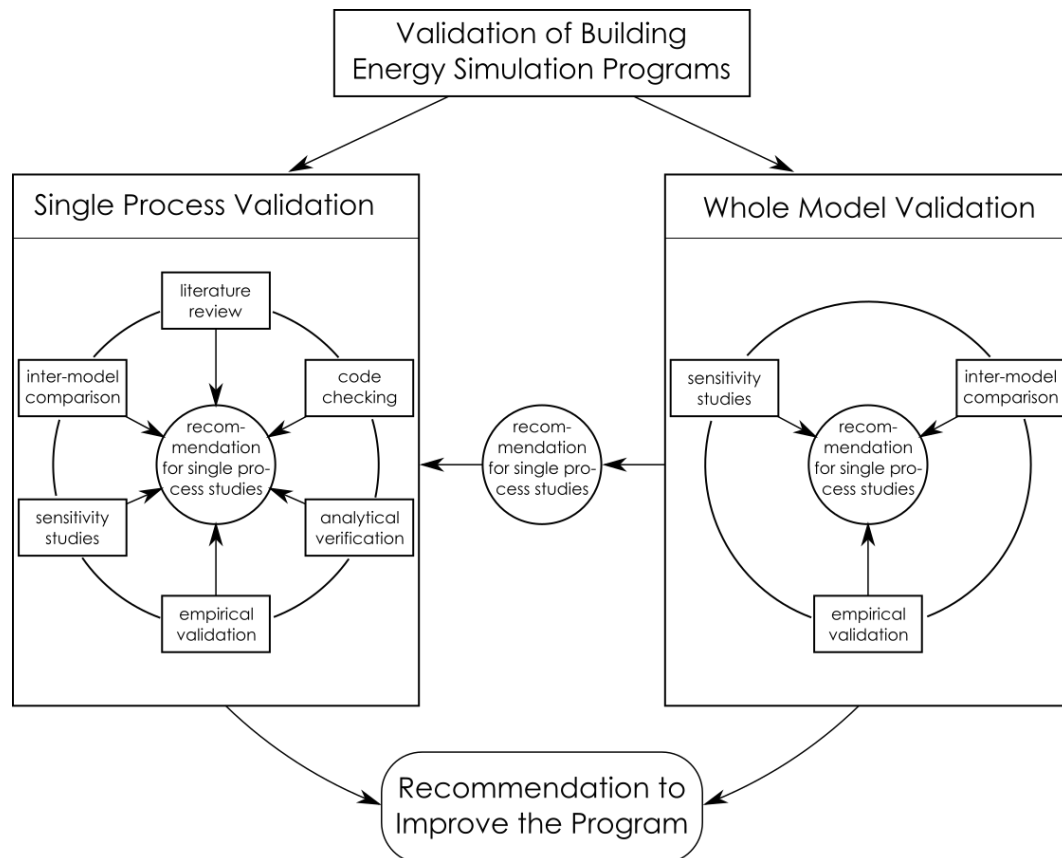


Figure 2.10 : Méthodologie de validation selon Jensen (1995)

Au-delà de ces deux méthodologies globales de validation peut également être citée la célèbre procédure de validation numérique d'outils de STD nommée **BESTEST** (« *Building Energy Simulation TEST* »). Cette procédure est issue d'un projet réalisé dans le cadre de l'AIE, via une coopération entre des experts des programmes « *Solar Heating and Cooling* » (tâche 12B) et « *Energy Conservation in Buildings and Community Systems* » (Annexe 21C) et pilotée par le NREL (National Renewable Energy Laboratory). La procédure BESTEST se base sur la modélisation d'un parallélépipède avec trois configurations de baies vitrées, comportant en tout 40 cas d'étude (35 monozone, 1 bizonne avec une température de consigne, et 4 monozone en évolution libre). Ces cas d'étude décrivent des cas très simples à des cas plus réalistes, et permettent d'analyser les modèles de transfert de chaleur. Comme l'indique Munaretto dans (Peuportier et al. 2016), les travaux ont initialement concerné l'enveloppe des bâtiments avant d'être complétés par la suite aux équipements de chauffage et de ventilation, aux transferts thermiques avec le sol, et aux échanges entre différentes zones. Ainsi différents modes constructifs sont testés (p. ex. bâtiments à faible ou forte inerties) pour comparer les outils entre eux. La version initiale du BESTEST (Judkoff et Neymark 1995) a été formalisée dans un standard (ASHRAE 2001), et sa future évolution pour s'adapter aux nouvelles exigences des modélisateurs a été récemment discutée par ses auteurs (Judkoff et Neymark

2013). Parmi les perspectives d'évolution évoquées lors de cette conférence, figure l'augmentation de la résistance thermique des parois opaques et vitrées pour se rapprocher des standards à basse consommation d'énergie.

2.2.4.4. LES MODÈLES À L'ÉPREUVE DES BÂTIMENTS À HAUTE PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE

La préoccupation de fiabilité des modèles de simulation n'est pas nouvelle puisque ces derniers ont fait l'objet de campagnes approfondies de validation (Judkoff et Neymark 1995; Jensen 1995) ayant démontré leur capacité à prédire de manière satisfaisante le comportement thermique des bâtiments de cette période. Néanmoins, elle se pose à nouveau aujourd'hui, avec la progression vers des bâtiments à (très) haute performance énergétique, incluant des ruptures technologiques.

La procédure BESTEST, dans sa version de 1995, n'étudie en effet que des bâtiments pas ou faiblement isolés thermiquement. De plus, différentes hypothèses de modélisation pourraient être mises en défaut du fait de la prépondérance nouvelle de phénomènes physiques jusqu'à présent négligés ou mal pris en compte. Duforestel (2008) dresse un éventail fourni à ce sujet, soulignant de nombreuses hypothèses qui ne sont plus adaptées aux nouveaux besoins en matière de modélisation énergétique. Dans sa thèse, Spitz (2012) en détaille une partie, à savoir :

- l'utilisation du pas de temps horaire ;
- le positionnement de la station météorologique ;
- la simulation de la tâche solaire ;
- la simulation de la ventilation naturelle ;
- l'estimation du confort thermique dans un bâtiment naturellement ventilé ;
- l'estimation des charges internes et le comportement des occupants ;
- la durée de vie des matériaux.

Par ailleurs, elle souligne d'autres hypothèses sur lesquelles une attention particulière doit être posée, parmi lesquelles :

- le découpage en zone thermique ;
- les effets du vent ;
- la présence de l'humidité dans les matériaux et l'air.

De plus, le secteur du bâtiment souhaite progresser vers la garantie de performance énergétique qui consiste à vérifier que les performances en exploitation sont bien en adéquation avec celles prévues en phase de conception. Or, il est bien souvent constaté des écarts entre consommation mesurée et estimée, en grande partie dus aux incertitudes sur la mise en œuvre, le comportement des occupants ou encore aux conditions météorologiques. Il

reste néanmoins essentiel de valider que la précision des codes de calcul soit suffisante pour améliorer le processus de conception et d'évaluation (Peuportier et al. 2016), et rendre la simulation opérationnelle auprès des professionnels de la construction.

Enfin, notons que cette problématique de la fiabilité des modèles doit à présent également être examinée pour les outils d'ACV, plus récents que leurs homologues de STD, mais qui pourraient être utilisés de manière croissante dans les prochaines années avec l'augmentation des exigences sur les aspects environnementaux des bâtiments.

2.2.4.5. FIABILITÉ DES MODÈLES RETENUS DANS CES TRAVAUX

L'état de l'art réalisé a mis en évidence qu'une condition nécessaire mais non suffisante pour disposer de solutions robustes en optimisation est de s'assurer de la fiabilité des modèles mis en œuvre, tout particulièrement dans le contexte des bâtiments performants. Par ailleurs, le chapitre 1 a donné lieu au choix justifié des outils *COMFIE* et *novaEQUER* pour la mise en œuvre de la démarche d'aide à la décision proposée. Si nous avons pu voir précédemment que valider complètement des outils aussi complexes que ceux mis en jeu dans le domaine du bâtiment est une gageure (Judkoff et al. 2008), nous proposons néanmoins d'aborder ce sujet dans la suite de ce chapitre, et de fournir quelques éléments rassurants sur les outils employés.

❖ **COMFIE**

L'outil *COMFIE*, développé à *MINES ParisTech*, a passé plusieurs processus de validation sur des cas d'étude datant des années 1990 (Peuportier 2005). En matière de **validation analytique**, et outre les processus de validation internes à ce sujet lors du développement de l'outil, citons la première étape d'une tâche lancée par l'AIE sur un banc d'essais multizones, et ayant consisté à vérifier la précision des calculs en régime permanent par rapport à une solution analytique dans une configuration bizonne définie. La deuxième étape de ce travail mené conjointement dans le cadre du programme « Chauffage et rafraîchissement solaire des bâtiments » (tâche 34) et du programme « Économie d'énergie dans les systèmes bâtiments et collectivités » (annexe 43) correspond, quant à elle, à une **validation expérimentale**, sur la base de mesures effectuées sur une cellule test de l'EMPA (Dübendorf, Suisse). Sur une période de 600 heures, des injections de chaleur sont réalisées, entrecoupées de plages d'évolution libre, permettant d'étudier le comportement dynamique du système par les modèles. La comparaison entre température simulée et température résultante a montré une légère sous-estimation des températures par le modèle, avec une différence de $-0,4^{\circ}\text{C}$. Les autres outils ayant participé à cette étude sont : *DOE 2* (USA),

EnergyPlus (USA), *ESP* (Grande-Bretagne), *HELIOS*, *SIMBAD* (France) et *TRNSYS* (USA). *COMFIE* a également été confronté à des mesures d'une cellule test du CEN à Cadarache, dans le cadre du projet européen PASSYS, déjà évoqué. Avec une véranda accolée à la cellule, les résultats de comparaison ont montré une bonne reproduction du comportement par le modèle (Peuportier 1993). Enfin, l'outil *COMFIE* a été impliqué dans des processus de **validation numérique**. Citons le banc d'essais de logiciels réalisé par les associations AICVF, AITF et ARMINES pour l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie et EDF auquel une douzaine de logiciels a participé, dont *CODYBA*, *SIMULA* et *TAS* par exemple. L'exercice a consisté à confronter les outils sur la base d'un bâtiment bizona avec l'une des zones très solarisée, et l'autre soumise à des apports internes variables, et ce, selon cinq scénarios impliquant différentes températures de consigne de climatisation et la prise en compte ou non de vitrage en toiture et de stores extérieurs (Brasselet et al. 1993). Les résultats sont globalement homogènes selon les scénarios, *COMFIE* présentant des besoins de climatisation se situant dans la moyenne haute du panel des logiciels. La procédure BESTEST (Judkoff et Neymark 1995) a aussi servi de support pour comparer *COMFIE* à des références internationales comme *DOE 2* ou *TRNSYS*. Les résultats montrent des écarts en de l'ordre de 10 à 15 % en moyenne, que ce soit pour les besoins annuels de chauffage et de climatisation. Une mise à jour des résultats est actuellement en cours.

Plus récemment, *COMFIE* a été comparé à d'autres logiciels sur un bâtiment à haute efficacité énergétique de la plateforme INCAS de l'INES, située au Bourget-du-Lac (Brun et al. 2009). Un ensemble représentatif d'outils utilisés en France (*EnergyPlus*, *TRNSYS*, *CoDyBa*, *COMFIE* et *PHPP*) a été comparé sur plusieurs variantes (hypothèses homogénéisées, modifications des valeurs des échanges convectifs, utilisation des paramètres par défaut des outils). Les résultats montrent un accord clair entre les logiciels, que ce soit en matière de température d'air et de besoins de chauffage, mais aussi en matière de puissance de chauffage à installer, et de nombres d'heures de surchauffe. L'étude indique par ailleurs une sensibilité forte des modèles à certains paramètres comme les valeurs des coefficients d'échanges convectifs.

❖ **novaEQUER**

Bien que plus récent (Polster 1995), le logiciel d'ACV *EQUER*, et son évolution *novaEQUER*, ont également pu être confronté à d'autres outils dans le cadre de validation numérique. Huit outils européens (dont *EQUER*) ont ainsi été comparés dans le cadre du réseau thématique européen PRESCO (Peuportier et al. 2004b), sur le cas d'une maison suisse à ossature bois. Les résultats sur la contribution à l'effet de serre calculée sur 80 ans diffèrent de plus ou moins 10 % selon les outils.

Dans le cadre du projet ANR *BENEFIS*⁵³ (Bilan Énergétique et Environnementale Fiable, Simple et reproductible des bâtiments), la reproductibilité des outils *novaEQUER* et *ELODIE*⁵⁴ a été étudiée en observant si le classement de différentes variantes (systèmes constructifs, types d'énergie de chauffage, avec ou sans photovoltaïque, etc.) était le même pour les deux outils, ou s'il était de nature à remettre en question la performance d'une variante par rapport à autre une variante. Globalement, une similitude dans la hiérarchisation des variantes a été constatée, même si des écarts sont toutefois apparus, mettant notamment en évidence des divergences sur les méthodes de calcul des indicateurs mais aussi d'approches dans la comptabilisation des exports d'énergie. Citons enfin le projet COIMBA⁵⁵ (Connaissance de l'Impact environnemental des Bâtiments) où *novaEQUER*, *SimaPro*, et *ELODIE* ont été comparés sur un bâtiment passif. Des travaux se poursuivent pour améliorer ce type d'outils et leur fiabilité (Pannier et al. 2016b).

2.2.5. Applications dans le domaine du bâtiment

Le secteur du bâtiment est en pleine mutation depuis plusieurs années, poussé par des exigences de performance énergétique régulièrement à la hausse. Dans ce nouveau contexte, et grâce à l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs, les analyses de sensibilité et d'incertitude sont utilisées de manière croissante dans cette communauté (Tian 2013). Elles visent selon nous trois applications principales :

- l'étude de la fiabilité des codes de simulation ;
- le développement de nouvelles aides à la décision, en conception comme en réhabilitation ;
- et la progression vers un processus de garantie de performance énergétique.

❖ Fiabilité des codes de calcul

Dans ce premier domaine d'application, plusieurs travaux de doctorat ont récemment été réalisés au niveau national, la plupart liés au projet ANR FIABILITE dédié à la question de fiabilité des prévisions des performances énergétiques des bâtiments. Si nous présentons ces travaux dans le cadre de la fiabilité des modèles, il est à signaler que certains d'entre eux correspondent également à une contribution notable vers la garantie de performance.

⁵³ <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-11-VILD-0001>

⁵⁴ <http://editions.cstb.fr/Products/Elodie>

⁵⁵ <http://www.construction21.org/france/community/pg/file/4/read/4604/rapport-coimba-connaissance-de-limpact-environnemental-des-btiments-dcembre-2011-synthse>

Les travaux de Spitz (2012) et Spitz et al. (2012) ont principalement porté sur l'évaluation et la hiérarchisation des incertitudes sur les résultats des simulations en phase de conception. Une analyse de sensibilité locale a tout d'abord été utilisée pour identifier les paramètres ayant une influence notable sur les résultats. Ces derniers ont ensuite été caractérisés pour être propagés via une méthode de type Monte-Carlo. Et enfin, une analyse de sensibilité globale par la méthode FAST a été menée pour calculer les indices principal et total. Cette méthodologie a été mise en œuvre sur la plateforme expérimentale INCAS située à l'INES (introduite chapitre 1 et précisée section 2.3.3 de ce chapitre) et avec le logiciel international *EnergyPlus*.

Les travaux de Goffart (2013) ont principalement visé à développer une méthodologie originale permettant de gérer les entrées fonctionnelles dans les méthodes classiques d'analyse de sensibilité. Cette approche, générique, a été appliquée aux données météorologiques, et plus précisément aux fichiers météo moyens (TMY) utilisés en STD.

Dans ses travaux, Merheb (2013) a mis en œuvre plusieurs types de méthodes d'ASAI selon l'échelle considérée. Une méthode déterministe a été utilisée pour estimer les paramètres thermo-physiques d'un échantillon avec garantie à partir d'un dispositif expérimental, tandis qu'une méthode ensembliste à base d'analyse par intervalles a été mise en œuvre à l'échelle de la paroi, et dont l'efficacité a été étudiée par comparaison avec les résultats d'une propagation d'incertitudes par Monte-Carlo. À l'échelle du bâtiment, un métamodèle sur la base de polynômes de chaos a été construit pour déduire les indices de Sobol et les caractéristiques probabilistes de la sortie considérée. Le fonctionnement du métamodèle étant limité à une vingtaine de paramètres, une ASL a au préalable été mise en œuvre pour ne retenir que les paramètres les plus influents.

Durant sa thèse de doctorat, Munaretto (2014) a entre autres mis en place une démarche de validation empirique sur l'outil français *COMFIE*, proche de celle de Spitz et al. (2012), afin d'étudier l'intérêt d'intégrer des modèles d'échanges convectifs et radiatifs détaillés pour évaluer l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments. Un criblage de Morris permet d'identifier les facteurs incertains les plus influents, dont les incertitudes sont propagées à l'aide d'un tirage par hypercubes latins. En parallèle de l'AI, une ASG est menée via le calcul des indices de Sobol. Une grandeur d'intérêt entre les températures mesurées et simulées a été définie, permettant d'effectuer les AS et la comparaison finale. Dans le développement de cette démarche globale, une contribution au travail collectif a été apportée. En effet, dans Recht et al. (2014), l'objectif était d'étudier la fiabilité de l'outil *COMFIE* à prédire le comportement thermique de bâtiments performants (ici une des maisons passives INCAS). Cette étude fait l'objet de la partie applicative de ce chapitre, et sera détaillée à partir de la partie 2.3.

Enfin, Bontemps (2015) met en œuvre une démarche de validation expérimentale de modèles appliquée à une cellule test de la plateforme BESTLab, et sur plusieurs protocoles expérimentaux. Une analyse de sensibilité locale a été utilisée mais la méthode de Morris est suggérée dans les perspectives à ces travaux. L'échantillonnage a été réalisé par tirage LHS et sa relative bonne performance constatée. Bontemps signale également avoir testé les méthodes de type quasi aléatoire pouvant être plus performantes que l'échantillonnage stratifié mais avec lesquelles des problèmes d'uniformité peuvent apparaître. L'analyse de sensibilité globale menée repose à l'instar de Merheb (2013) sur un métamodèle de type chaos polynomial.

Notons enfin des travaux similaires appliqués à des modèles d'analyses de cycle de vie des bâtiments (Pannier et al. 2016a) reprenant les méthodes utilisées pour les modèles de STD.

❖ Aide à la décision

Implémentées dans des outils professionnels, les méthodes d'ASAI fournissent une nouvelle **aide à la conception**. En effet, une analyse de sensibilité permettra d'identifier les facteurs les plus influents d'un projet ou une anomalie de saisie (par l'influence aberrante d'un facteur par exemple) afin d'orienter les efforts de l'équipe de conception ou réhabilitation. La connaissance des principaux leviers sur les indicateurs de performance ouvre également la voie **vers de l'optimisation**.

Par exemple, Lam et al. (2008) exploite une ASL pour identifier les principales sources d'économies dans les consommations électriques d'un bâtiment de bureau à Hong-Kong. Avec le même type de méthode, Demanuele et al. (2010) ont déterminé les facteurs ayant le plus d'importance sur la consommation d'énergie dans les écoles du Royaume-Uni. Ils ont visité quinze écoles afin de caractériser de manière plus réaliste les incertitudes. Par ailleurs, Flory-Celini (2008) a utilisé des plans d'expériences dans sa thèse pour identifier des solutions bioclimatiques à installer dans les bâtiments existants. Deux bâtiments ont été traités : un logement collectif des années 1900 et une maison individuelle construite en 1966. Heiselberg et al. (2009) ont quant à eux pu identifier les paramètres de conception les plus influents à modifier et optimiser pour réduire la consommation d'énergie primaire d'un bâtiment de bureaux au Danemark afin d'améliorer la conception des bâtiments durables. Une ASL est utilisée pour réduire à 21 le nombre de facteurs considérés pour une analyse de sensibilité par méthode de Morris, et finalement les classer en fonction de la moyenne des valeurs relatives des effets élémentaires, de manière à produire des informations intéressantes dès les phases de conception amont. En outre, Firth et al. (2010) ont utilisé une méthode d'analyse de sensibilité locale (approximation des différences finies) pour estimer l'influence de l'âge et du type de logement sur ses

émissions de CO₂. Enfin, Evins et al. (2012) ont utilisé un plan factoriel complet à deux niveaux pour ne retenir que 21 variables parmi 103 initiales. Une optimisation multicritère grossière a ensuite été menée sur ces variables sélectionnées pour finalement effectuer une optimisation plus détaillée sur 14 variables finales.

❖ **Vers la garantie de performance énergétique**

L'évaluation des incertitudes est essentielle dans un processus de garantie de performance énergétique puisqu'elle permet d'évaluer le risque de dépasser la consommation annoncée contractuellement. En effet, il existe une multitude de sources d'incertitudes pouvant générer des différences entre prévisions et mesures, et il est donc essentiel de les prendre en compte et de les propager au travers des outils de simulation thermique des bâtiments. Ce glissement, amorcé mais encore à développer, d'une approche déterministe à une approche probabiliste de la performance est un réel changement de paradigme. Dans cette nouvelle approche, un projet de bâtiment légèrement plus consommateur en moyenne qu'un autre pourrait néanmoins être retenu car il présente un écart-type plus faible, et donc un risque moindre de ne pas respecter cette valeur moyenne garantie. En exemple, citons les travaux de Ligier et al. (2016), qui utilisent un criblage de Morris avant de propager les incertitudes sur les paramètres par séquence de Sobol, mais aussi d'évaluer la variabilité sur les données climatiques afin de construire un modèle d'ajustement pour la garantie de performance.

En synthèse de cette section, de nombreuses études d'analyse de sensibilité ont déjà été menées dans le domaine de la simulation thermique et énergétique des bâtiments. L'ensemble des types de méthodes (locales, de criblage, et globales) ont été mises en œuvre, même si une évolution des méthodes locales (créées historiquement en premier, et plus simples à mettre en place) vers les méthodes globales est palpable, pour les nombreux avantages déjà évoqués de ces dernières.

2.2.6. Conclusion sur l'état de l'art

Dans cette première partie de chapitre, un état de l'art sur les analyses de sensibilité et d'incertitude et les méthodes associées, a été réalisé. Il a permis de mettre en évidence l'intérêt pratique de ces méthodes pour différentes applications dans le domaine du bâtiment notamment pour l'aide à la décision en conception et pour l'étude de la fiabilité des modèles. Selon le contexte, les AS permettent effectivement d'identifier les facteurs de conception les plus influents de manière à pouvoir réduire la combinatoire d'un problème d'optimisation ou bien d'identifier et d'étudier les facteurs incertains les plus

prépondérants et ainsi que les interactions lors d'une exploration de modèle visant à mieux comprendre un modèle ou à détecter d'éventuelles sources d'erreurs. Parallèlement aux AS, les AI offrent par exemple la possibilité d'évaluer un niveau de robustesse de différentes solutions obtenues à la suite d'une optimisation ou bien d'estimer le degré de fiabilité d'un modèle dans le cadre d'un processus de validation.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous proposons d'illustrer l'intérêt de quelques unes de ces méthodes sur une étude de cas. L'objet de cette étude est de mener une démarche de validation empirique sur un modèle de simulation thermique dynamique dans le cadre d'une maison à haute performance énergétique, l'objectif étant d'apporter une contribution dans la vérification de sa capacité à prédire de manière satisfaisante le comportement thermique de ce type de bâtiment, et ainsi de justifier la pertinence de son utilisation dans la démarche d'aide à la décision pour l'écoconception de maisons à énergie positive que nous proposons.

2.3. ÉTUDE DE CAS – MÉTHODOLOGIE

2.3.1. Démarche et objectifs

Afin d'apporter une contribution dans l'étude de la fiabilité des outils de simulation retenus, nous présentons dans la suite de ce chapitre la mise en œuvre d'une démarche de validation empirique de l'outil *COMFIE* (Recht et al. 2014), proche de celle de Spitz (2012). Ce type de démarche nécessitant des moyens importants (bâtiment expérimental, capteurs, etc.) et une attention particulière dans la rigueur du protocole expérimental, nous nous sommes appuyés sur une des maisons passives instrumentées sur la plateforme expérimentale INCAS gérée par l'INES⁵⁶. L'objectif a été de comparer des mesures de température à des températures simulées en prenant en compte les incertitudes pouvant peser à la fois sur les capteurs et les facteurs d'entrée en simulation, de manière à les dissocier des biais attribuables au modèle lui-même.

La section 2.3.2 rappelle les éléments de base du modèle *COMFIE*, la section 2.3.3 présente synthétiquement le cas d'étude, et la section 2.3.4 décrit les méthodes d'ASAI utilisées pour mettre en place cette démarche de validation

⁵⁶ INES : Institut National de l'Énergie Solaire

2.3.2. *Modèle thermique de bâtiment*

COMFIE, modèle thermique dynamique de bâtiment (Peuportier et Blanc-Sommereux 1990), repose sur le concept de « zone thermique », sous-ensemble du bâtiment considéré à température homogène dans lequel les murs sont divisés en mailles et l'air, le mobilier et les cloisons légères sont regroupés dans une maille unique. Un bilan thermique est appliqué sur chaque maille et prend la forme de l'équation (2.3) :

$$C_{\text{maille}} \frac{dT_{\text{maille}}}{dt} = \dot{Q}_G - \dot{Q}_P \quad (2.3)$$

avec :

- C_{maille} la capacité thermique de la maille ;
- T_{maille} 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 et 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 (2.3) sous la forme d'un système d'équations linéaires (2.4).

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 (Bacot et al. 1984; Lefebvre 1987) :

$$\begin{cases} C\dot{T}(t) = AT(t) + EU(t) \\ Y(t) = JT(t) + GU(t) \end{cases} \quad (2.4)$$

avec :

- T le champ discrétisé des températures ;
- C la matrice diagonale des capacités thermiques ;
- U le vecteur des sollicitations ;
- Y le vecteur des sorties (température intérieure prenant en compte l'air et les surfaces des murs) ;
- et A, E, J, G les matrices reliant les vecteurs $T(t)$ et $U(t)$ aux dynamiques du système.

Ce système d'ordre élevé est réduit par analyse modale pour rendre sa résolution plus rapide. Sa simulation nécessite de connaître les sollicitations, en particulier les émissions de chaleur par les occupants et les équipements, mais

également les données météorologiques locales concernant la température extérieure et le rayonnement solaire.

Pour davantage de détails, le lecteur pourra se référer au chapitre 2 de la thèse de Robillart (2015).

2.3.3. Cas d'étude

Le bâtiment étudié correspond à la maison « I-BB » (béton banché) de la plateforme INCAS. Cette maison a été déjà présentée dans le paragraphe 1.1.4.2. Pour plus de détails, le lecteur pourra par exemple se référer à la thèse de Spitz et al. (2012) pour une revue détaillée des données disponibles sur cette maison, et à la thèse de Munaretto (2014) pour une description exhaustive des principales hypothèses de modélisation effectuées pour la simuler sous *COMFIE*. De ce fait, nous ne proposons ici qu'un rappel synthétique sur ce cas d'étude connu.

Tout d'abord, rappelons que cette maison est inhabitée ce qui permet de s'affranchir des incertitudes liées aux occupants. La période d'étude considérée se divise en six scénarios, et correspond aux quatre premiers mois de l'année 2012. Ensuite, le protocole expérimental appliqué permet de connaître précisément les sollicitations auxquelles elle a été soumise et comporte des modifications de la consigne de chauffage, du régime et du débit de la VMC, de l'ouverture/fermeture des volets et de la séparation aéraulique de l'étage avec le rez-de-chaussée, présentées Figure 2-11. Finalement, les températures d'air intérieur ont été mesurées via des sondes de platine protégées par des boucliers thermiques. Compte-tenu des incertitudes intrinsèques des capteurs, des effets induits par le bouclier thermique, et de l'inhomogénéité de température dans les pièces, Spitz (2012) propose d'appliquer une bande d'incertitudes de $\pm 1^\circ\text{C}$. Un fichier de données météorologiques au pas de temps horaire a été considéré sur la période d'étude à l'aide de mesures (température extérieure, rayonnement solaire global et diffus horizontal) provenant de l'aéroport du Bourget-du-Lac, situé à quelques centaines de mètres de la maison I-BB. Un zonage thermique pièce par pièce a été considéré, et les ponts thermiques ont été calculés par discrétisation en éléments finis (logiciel *Trisco*). L'échangeur de la VMC double-flux a été by-passé sur tout le protocole. Les températures des zones ont été initialisées à celles des mesures de la première heure (le bâtiment ayant été chauffé à 20°C les semaines précédentes) et les profils de température des parois correspondent à ceux en régime permanent avec les températures d'air extérieur et de zone comme conditions aux limites. Les mouvements d'air intérieur ont été estimés par un calcul aéraulique (logiciel *CONTAM*).

Scénario		1	2	3	4	5	6	
Consigne		20°C	Off	Off	24°C	Off	Off	
Débit VMC		110 m³/h	0	0	110 m³/h	110 m³/h	160 m³/h	
Volets		Fermés	Fermés	Fermés	Fermés	Ouverts	Ouverts	
Séparation RDC/R+1		Avec	Avec	Sans	Avec	Sans	Sans	
		01/01	16/01	09/02	20/02	15/03	31/03	22/04

Figure 2-11. Protocole expérimental appliqué à la maison I-BB du 01/01/2012 au 22/04/2012

2.3.4. Analyses de sensibilité et propagation d'incertitudes

La démarche a consisté à comparer des mesures de température d'air intérieur avec les températures évaluées par le modèle. Pour cette comparaison, il convient de prendre en compte les incertitudes qui pèsent sur les facteurs d'entrée du modèle, par exemple les débits d'air entre les différents locaux ou la valeur de réflexion du sol (albédo) autour de la maison. En effet, les écarts observés ne peuvent pas être directement imputés à des biais du code de simulation, comme par exemple les divergences entre le bâtiment réel et les données saisies pour la simulation ou les erreurs dans l'acquisition des données expérimentales (mesures bruitées ou manquantes, fréquence d'acquisition non adaptée, étalonnage des sondes, interférence, etc.). Dans ce type de procédure de validation, il s'agit d'être en mesure d'intégrer ces erreurs et incertitudes pour être en mesure de conclure sur une éventuelle déficience du modèle (Lomas et al. 1997). Dans cette optique, une propagation d'incertitudes a été menée de manière à encadrer les températures simulées d'une bande d'incertitudes pour les comparer aux mesures de température, également enveloppées d'une bande d'incertitudes. En parallèle, une analyse de sensibilité globale a été réalisée pour permettre d'orienter les efforts pour une meilleure connaissance de facteurs identifiés comme fortement influents ou de repérer une erreur (p. ex. un facteur qui présenterait une influence anormale). Comme un ensemble de 153 facteurs incertains a été considéré (Tableau C-1), une opération de criblage a été nécessaire pour permettre d'effectuer l'ASG dans des temps de calcul raisonnable. Les paragraphes suivants ont pour objectif de justifier et de décrire les méthodes employées.

2.3.4.1. GRANDEUR D'INTÉRÊT

Comme introduit en début de ce chapitre, les AS s'appliquent vis-à-vis d'une grandeur d'intérêt. Cette grandeur peut être une sortie directe du modèle ou alors un indicateur construit à partir d'une ou plusieurs de ces sorties. Dans cette étude, l'erreur-type entre les mesures de température intérieure et les températures évaluées par simulation a été considéré comme grandeur d'intérêt pour l'opération de criblage et l'ASG réalisées. L'erreur-type correspond à la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne, moyenne des carrés des écarts entre les températures simulées et mesurées. À chaque zone thermique z de chaque scénario s de chaque simulation i , l'erreur-type, notée $RMSE_{i,s,z}$ (« *Root Mean Square Error* »), est définie par l'équation (2.5) :

$$RMSE_{i,s,z} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{k=N_{d_s}}^{N_{f_s}} (T_{i,z}^{sim}(k\Delta t) - T_{i,z}^{mes}(k\Delta t))^2} \quad (2.5)$$

avec :

- Δt le pas de temps de la simulation ;
- N_{d_s} et N_{f_s} respectivement les nombres de pas de temps correspondant au début et à la fin du scénario s ;
- N_s le nombre de pas de temps sur le scénario s , et valant $N_{f_s} - N_{d_s} + 1$;
- et $T_{i,z}^{sim}(k\Delta t)$ et $T_{i,z}^{mes}(k\Delta t)$ respectivement les températures simulée et mesurée à l'instant $k\Delta t$.

Pour disposer d'une grandeur permettant de résumer en une valeur l'information relative à un scénario d'une simulation donnée pour l'ensemble de la maison, une agrégation par zone au prorata des surfaces a été réalisée.

2.3.4.2. OPÉRATION DE CRIBLAGE

À partir du nombre élevé de facteurs considérés (153), d'un coût CPU⁵⁷ relativement faible (inférieur à la minute) et du fait qu'aucune hypothèse *a priori* de régularité (linéarité, monotonie) sur le modèle n'est posée, le diagramme de décision de Rocquigny et al. (2008) (Figure 2.8) suggère le choix d'une méthode de criblage. Parmi celles existantes, nous avons retenu le criblage de Morris. Cette méthode permet effectivement de traiter un grand nombre de facteurs et offre une prise en compte des interactions sans supposer d'hypothèses fortes sur le modèle (même si l'évaluation est moins précise que pour une ASG). De plus, elle nécessite un ordre de grandeur d'appels au modèle (plusieurs centaines à quelques milliers) compatible avec le coût CPU d'une simulation, et est facile à

⁵⁷ CPU : « central processing unit »

mettre en place. Ces arguments étant également valables pour un processus d'optimisation, notre choix pour identifier les facteurs de conception les plus influents se portera également sur le criblage de Morris.

La méthode de Morris (Morris 1991; Saltelli et al. 2000) consiste à tout d'abord considérer un intervalle d'incertitude sur chaque facteur incertain, en fixant une valeur haute et basse. Chaque intervalle est alors discrétisé en un nombre Q satisfaisant de niveaux (2 à 8 typiquement), puis normalisé pour obtenir une gamme de variation de la forme $\llbracket 0; \frac{1}{Q-1}; \frac{2}{Q-1}; \dots; 1 \rrbracket$. Cette transformation linéaire rend adimensionnelles les variations effectuées en entrée afin de comparer des paramètres de nature physique différente. Le principe de la méthode est alors de répéter r fois ($r = 5$ à 10 généralement) un plan OAT aléatoirement dans l'espace discrétisé des entrées. « Aléatoirement » signifie que le jeu de départ des facteurs d'entrée est tiré de manière aléatoire. Il en est de même pour l'ordre des facteurs à modifier au sein d'un plan OAT.

L'espace des entrées peut être alors vu comme une « grille » de nœuds de dimension d , un plan OAT comme une « trajectoire » dans l'espace des entrées, et une modification du facteur j comme un « saut » entre deux nœuds de la dimension j de la grille. La longueur du saut Δ , est proportionnelle à $\delta = \frac{1}{Q-1}$. Une illustration est donnée à la Figure 2-12. Pour garantir l'uniformité dans la distribution des points échantillonnés, Morris suggère une longueur de saut valant $\Delta = \frac{Q}{2} * \delta$, avec Q pair.

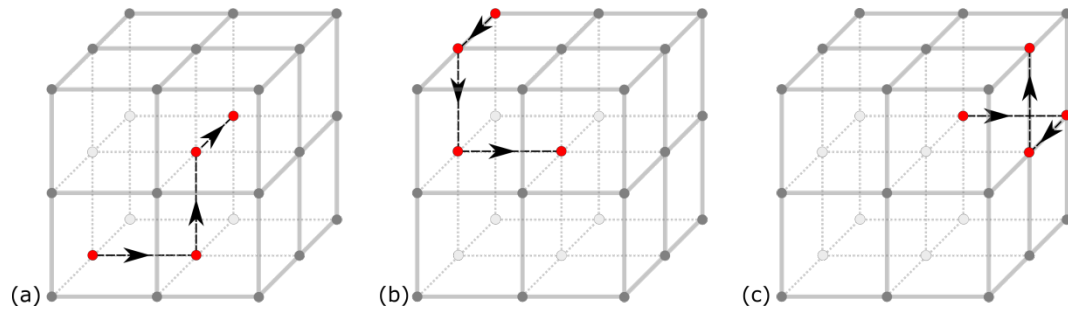


Figure 2-12. Exemple d'échantillonnage dans la méthode de Morris, avec $d = 3$ facteurs incertains, $Q = 3$ niveaux, $\Delta = 1/2$, et $r = 3$ trajectoires (a), (b), (c) à partir de Munaretto (2014)

A chaque répétition, la valeur de tous les paramètres d'entrée aura donc été modifiée une et une seule fois. La méthode requiert donc $r \times (d + 1)$ évaluations du modèle. Chaque répétition (ou trajectoire) i permet de calculer un « effet élémentaire » pour le facteur j (2.6) :

$$E_j^i = \pm \frac{\mathcal{F}(x_1^i, \dots, x_j^i \pm \Delta, \dots, x_K^i) - \mathcal{F}(x_1^i, \dots, x_j^i, \dots, x_K^i)}{\Delta} \quad (2.6)$$

avec $\mathcal{F}$ le modèle étudié, et $x_1, \dots, x_d$ les d facteurs incertains. Une fois les r répétitions effectuées, chaque facteur incertain possède r effets à partir desquels sont calculés la moyenne des valeurs absolues de ces effets μ_j^* et l'écart-type de ces effets σ_j . Les expressions sont données respectivement par les équations (2.7) et (2.8).

$$\mu_j^* = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r |E_j^i| \quad (2.7)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (E_j^i - \mu_j)^2} \quad (2.8)$$

Pour éviter que des effets élémentaires de signe opposé ne se compensent, μ_j^* est préférée à μ_j , la moyenne des effets. Plus μ_j^* est élevée, plus l'entrée j contribue à une sortie incertaine. σ_j donne, quant à lui, une information sur les interactions et la linéarité du modèle. Plus σ_j est élevé, plus les effets de non-linéarité et d'interactions sont marqués. En effet, Iooss (2011) explique que « si la sortie dépend linéairement du facteur j et qu'il n'interagit pas avec d'autres entrées, [...] σ_j est alors égal à zéro. Par conséquent, plus σ_j est élevé (par rapport à μ_j^*), moins l'hypothèse de linéarité et de non interaction est pertinente ». Un graphique dit de Morris, représentant σ_j en fonction de μ_j^* , pour tout j peut finalement être tracé (§ 2.2.3.4). Outre une interprétation visuelle des résultats, une analyse quantitative peut également être menée, via par exemple le calcul d'une distance à l'origine pour chaque (correspondant à un facteur). Cela peut servir de base à l'établissement d'une hiérarchisation.

Dans cette étude, un classement de ce type a été réalisé et sera présenté dans la partie 2.4, concernant les résultats. Le nombre de répétitions des plans OAT générés par la méthode de Morris a été fixé à 30, tandis que le nombre de niveaux de discrétisation a été choisi à 6. Pour δ , nous avons suivi les recommandations de Morris, à savoir $\frac{Q}{2(Q-1)}$ soit 0,6. Au total, 153 facteurs incertains ont été étudiés. L'incertitude pesant sur la valeur de chacun de ces facteurs a été encadrée par une borne inférieure et une borne supérieure. Ces encadrements ont été obtenus soit à partir de données de mesures, soit d'après la littérature, soit par jugement expert. L'ensemble des détails est consultable dans le tableau B5 de la thèse de Munaretto (2014). Avec 30 répétitions, 4 620 simulations ont été nécessaires pour mener l'analyse. L'échantillonnage originel de la méthode (Morris 1991) a été préféré à la variante par simplexe proposée par Pujol (2009) ou l'optimisation du tirage développée par (Campolongo et al. 2007), inapplicable pour des nombres r et d trop élevés car nécessitant trop de calculs.

2.3.4.3. PROPAGATION D'INCERTITUDES

Pour permettre la propagation des incertitudes à travers le modèle, une méthode par approche ensembliste a été retenue pour les caractéristiques données en section 2.2.2. Dans cette approche, notre choix s'est porté sur l'échantillonnage LHS simple du fait son efficacité généralement meilleure (vis-à-vis d'un tirage aléatoire), sa rapidité d'exécution (par rapport à un tirage LHS optimisé dont le calcul de critères géométriques peut être prohibitif) et sa popularité (par rapport aux tirages quasi-aléatoires, plus performantes dans certaines conditions mais posant des problèmes d'uniformité dans d'autres).

Pour rappel, la méthode LHS (McKay et al. 1979; Stein 1987) consiste à découper l'intervalle de chaque facteur j en p segments équiprobables, puis à tirer aléatoirement une et une seule valeur dans chacun de ces segments, ce qui garantit une couverture uniforme du domaine de chaque facteur. Par contre, la qualité de la répartition conjointe des valeurs tirées pour deux ou plus de facteurs d'entrée n'est pas assurée par cette méthode. La Figure 2-13 propose une illustration d'une stratification par méthode LHS dans le cas de deux facteurs avec des lois uniformes entre 0 et 1. Dans cet exemple, la répartition conjointe apparaît visuellement plutôt de qualité, même si cela est fortuit.

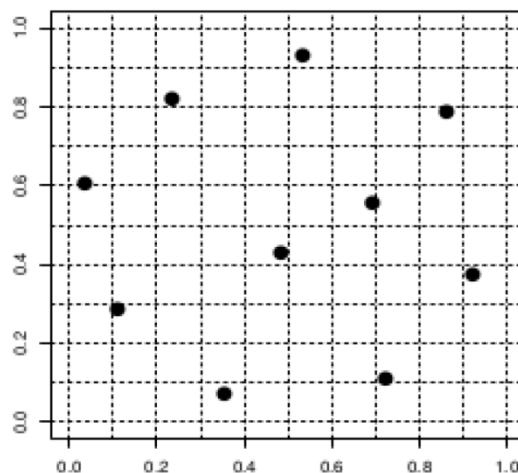


Figure 2-13. Illustration d'une stratification d'un espace par méthode LHS, et d'un échantillonnage associé dans le cas de deux facteurs avec des lois uniformes entre 0 et 1

Dans cette étude, les 11 facteurs d'entrée les plus influents suite à la méthode de Morris ont été retenus pour permettre de mener l'analyse de sensibilité globale, réalisée en parallèle de la propagation d'incertitudes. Des fonctions de densité de probabilité (FDP) ont ainsi été caractérisées, et sont décrites dans le Tableau 2-1. Il s'agit soit de lois uniformes soit de lois normales tronquées. Pour ces deux types de lois, les bornes correspondent à celles fixées pour le criblage de

Morris. Les lois normales tronquées présentent l'avantage d'éviter des valeurs non physiques (p. ex. conductivité inférieure à 0). L'espérance μ de ces lois correspond au milieu de l'intervalle d'incertitudes défini pour le criblage de Morris. L'écart-type σ a, quant à lui, été déterminé en considérant que les bornes de cet intervalle correspondait à plus ou moins trois fois l'écart-type par rapport à l'espérance. Suite à l'expérience de travaux antérieurs (Wodli 2012), la taille d'échantillon a été fixée à $N = 7\,000$.

Tableau 2-1. Fonctions de densité de probabilité (FDP) des incertitudes sur les 11 facteurs incertains sélectionnés

Facteurs	FDP	μ	σ	a	b
P_{ch-nom}	Normale tronquée à l'intervalle $[a; b]$	1200	20	1140	1260
Q_{v-nom1}	Normale tronquée à l'intervalle $[a; b]$	110,0	11,0	93,5	126,5
Q_{v-nom2}	Normale tronquée à l'intervalle $[a; b]$	160	16	136	184
ΔT_{ext}	Normale tronquée à l'intervalle $[a; b]$	0,5	0,5	-1,0	2,0
Alb	Uniforme sur l'intervalle $[a; b]$	-	-	0,3	0,4
$\%Gh$	Normale tronquée à l'intervalle $[a; b]$	0,0	2,5	-5,0	5,0
R_{occ}	Uniforme sur l'intervalle $[a; b]$	-	-	0,1	0,3
F_{occ}	Uniforme sur l'intervalle $[a; b]$	-	-	95	100
$\lambda_{PolystMur}$	Normale tronquée à l'intervalle $[a; b]$	0,030	0,003	0,027	0,033
C_{vol-BB}	Normale tronquée à l'intervalle $[a; b]$	2116	210	1906	2326
$h_{cePvExt}$	Normale tronquée à l'intervalle $[a; b]$	14,9	3,0	5,6	24,7

2.3.4.4. ANALYSE DE SENSIBILITÉ GLOBALE

Pour mener l'analyse de sensibilité globale proposée en complément de la propagation d'incertitudes, nous avons fait le choix d'une méthode d'estimation des indices de Sobol par décomposition de la variance. En effet, au regard du nombre volontairement bas de facteurs sélectionnés suite au criblage de Morris, d'un coût CPU toujours relativement faible, et du fait qu'aucune hypothèse *a priori* de régularité (linéarité, monotonie) sur le modèle n'est posée, ce type de méthode est recommandée par le diagramme de décision de Rocquigny et al.

(2008) (Figure 2.8). De plus, nous avons retenu de calculer les indices de sensibilité principal et total. Ces indices sont les plus courants dans la littérature, et permettent déjà de fournir des informations riches. Si la méthode originelle pour estimer ces indices a été proposée par Sobol (1993), plusieurs améliorations ont depuis été développées pour accélérer la convergence de ces estimations, nous décrivons ici l'extension développée par Saltelli et al. (2008). Cette méthode consiste à générer deux matrices u et v de taille (N, p) où les valeurs sont tirées par une méthode d'échantillonnage (LHS dans notre cas), et dont les expressions sont données par les équations (2.9) et (2.10).

$$u = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & \dots & x_i^{(1)} & \dots & x_d^{(1)} \\ x_1^{(2)} & x_2^{(2)} & \dots & x_i^{(2)} & \dots & x_d^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{(N-1)} & x_2^{(N-1)} & \dots & x_i^{(N-1)} & \dots & x_d^{(N-1)} \\ x_1^{(N)} & x_2^{(N)} & \dots & x_i^{(N)} & \dots & x_d^{(N)} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$v = \begin{bmatrix} y_1^{(1)} & y_2^{(1)} & \dots & y_i^{(1)} & \dots & y_d^{(1)} \\ y_1^{(2)} & y_2^{(2)} & \dots & y_i^{(2)} & \dots & y_d^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_1^{(N-1)} & y_2^{(N-1)} & \dots & y_i^{(N-1)} & \dots & y_d^{(N-1)} \\ y_1^{(N)} & y_2^{(N)} & \dots & y_i^{(N)} & \dots & y_d^{(N)} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Une troisième matrice w_i (pour i allant de 1 à K) issue de u et de v est alors créée :

$$w_i = \begin{bmatrix} y_1^{(1)} & y_2^{(1)} & \dots & x_i^{(1)} & \dots & y_d^{(1)} \\ y_1^{(2)} & y_2^{(2)} & \dots & x_i^{(2)} & \dots & y_d^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_1^{(N-1)} & y_2^{(N-1)} & \dots & x_i^{(N-1)} & \dots & y_d^{(N-1)} \\ y_1^{(N)} & y_2^{(N)} & \dots & x_i^{(N)} & \dots & y_d^{(N)} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Le modèle est ensuite évalué pour ces trois matrices échantillons, ce qui représente un total de $N \times (d + 2)$ appels à ce dernier, soit 91 000. Notons alors les vecteurs de sorties :

$$z_u = \mathcal{F}(u) \quad (2.12)$$

$$z_v = \mathcal{F}(v) \quad (2.13)$$

$$z_{w_i} = \mathcal{F}(w_i) \quad (2.14)$$

Les indices principal et total sont finalement calculés de la manière suivante :

$$SI_i = \frac{\frac{1}{N} \times (\sum_{j=1}^N z_u^{(j)} \times z_{w_i}^{(j)}) - f_0^2}{\frac{1}{N} \times (\sum_{j=1}^N z_u^{(j)^2}) - f_0^2} \quad (2.15)$$

$$TSI_i = 1 - \frac{\frac{1}{N} \times (\sum_{j=1}^N z_v^{(j)} \times z_{w_i}^{(j)}) - f_0^2}{\frac{1}{N} \times (\sum_{j=1}^N z_u^{(j)^2}) - f_0^2} \quad (2.16)$$

avec :

$$f_0^2 = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^N z_u^{(j)} \quad (2.17)$$

2.4. ÉTUDE DE CAS - RÉSULTATS

2.4.1. Opération de criblage

La Figure 2-14 et la Figure 2-15 présentent respectivement les graphiques $(\sigma; \mu^*)$ et $(\sigma; \mu)$ de Morris pour les six scénarios étudiés. La première constatation globale qui peut être faite est qu'une minorité (de l'ordre de la dizaine) de facteurs semble prépondérants vis-à-vis de l'ensemble des autres facteurs. La seconde observation générale est le fait que l'ensemble des points $(\sigma_i; \mu_i^*)$ semblent globalement alignés selon une même droite. En analysant, scénario par scénario, les remarques suivantes peuvent être émises.

Dans le premier scénario, une forte influence des paramètres ΔT_{ext} (delta contant de température ajouté à la température extérieure mesurée), Q_{v-nom1} (bas débit de ventilation), P_{ch-nom} (puissance de chauffage nominale), R_{occ} (résistance thermique additionnelle des volets roulants), et $\lambda_{polysMur}$ (conductivité thermique du polystyrène des murs verticaux) est observée. L'émergence du débit modéré de ventilation Q_{v-nom1} est cohérente puisque c'est celui appliqué lors de ce scénario. De même, le chauffage étant actif dans ce scénario, il est assez logique que la puissance de chauffage puisse être identifiée comme influente. La résistance thermique additionnelle des volets roulants étant très incertaine, son influence apparaît importante quoique relativement inattendue.

Dans le second scénario, la capacité thermique volumique du béton banché C_{vol-BB} ressort comme influent ce qui peut s'expliquer par le fait que l'inertie lourde des murs associée à l'isolation thermique par l'extérieure de la maison jouent un rôle important dans la vitesse de décroissance des températures intérieures, une fois le chauffage mis à l'arrêt. Dans ce scénario en évolution libre, il semble également logique de voir apparaître les facteurs ΔT_{ext} et R_{occ} comme

prépondérants. Remarquons enfin que le scénario continue d'être influencé par l'incertitude pesant sur le débit de ventilation appliqué lors du scénario n° 1. La température à un instant $t + \Delta t$ étant fonction de la température à l'instant t précédent, l'influence de la ventilation Q_{v-nom1} attribuable lors de son activation dans le scénario persiste ainsi sur le scénario 2.

Les constatations faites pour le scénario 2 peuvent également être émises pour le scénario 3, prolongement du scénario 2 à la différence que les mouvements d'air entre les deux étages par l'escalier sont à présent bloqués, mais n'ont que peu d'incidence sur le comportement thermique global du bâtiment, sachant que la grandeur d'intérêt correspond à une moyenne pondérée de l'ensemble des températures des zones. Notons toutefois que l'influence du débit de ventilation Q_{v-nom1} diminue logiquement (la corrélation entre une température entre deux instants t et t' est d'autant plus faible que la durée entre ces deux instants est grande).

Le scénario 4 présente des similitudes avec le scénario 1 à l'exception du facteur C_{vol-BB} . Le scénario 4 correspondant effectivement à une remontée en température du bâtiment puisqu'au début du scénario 4, la température intérieure est aux alentours des 5°C , alors qu'elle atteint plus de 21°C à la fin du scénario. Dans ce contexte, nous retrouvons de manière cohérente l'influence significative de la capacité thermique volumique du béton banché. L'activation du chauffage explique logiquement que la puissance maximale de chauffage apparaît à nouveau comme facteur prépondérant. Il est à noter que les températures de consigne n'ont jamais été atteintes du fait d'une puissance limitée et du by-pass de l'échangeur thermique de la VMC.

Dans le scénario 5, caractérisé par l'ouverture des volets, les facteurs qui ressortent comme les plus influents sont ceux relatifs aux apports solaires à savoir le coefficient de réflexivité du sol (Alb) et pourcentage constant ajouté au rayonnement solaire global horizontal ($\%Gh$). Un phénomène de persistance est à nouveau observable, concernant ici la puissance de chauffage (le chauffage étant bien coupé dans le scénario 5 mais actif dans le scénario 4). Pour la même raison, le facteur d'occultation des volets conserve une importance dans ce scénario alors que dans ce scénario, les volets sont entièrement ouverts (mais étaient fermés dans le scénario précédent).

Dans le scénario 6, un haut débit de ventilation est imposé expliquant fort logiquement l'importance du facteur Q_{v-nom2} . Néanmoins, ΔT_{ext} reste le facteur prépondérant dans ce scénario. Les volets restant ouverts, les facteurs en lien avec les apports solaires figurent toujours parmi les plus significatifs, ce qui peut expliquer l'apparition du facteur solaire des fenêtres sud du salon (F2) dans les facteurs les plus influents. L'absorptivité des enduits extérieurs se révèle également important dans ce scénario.

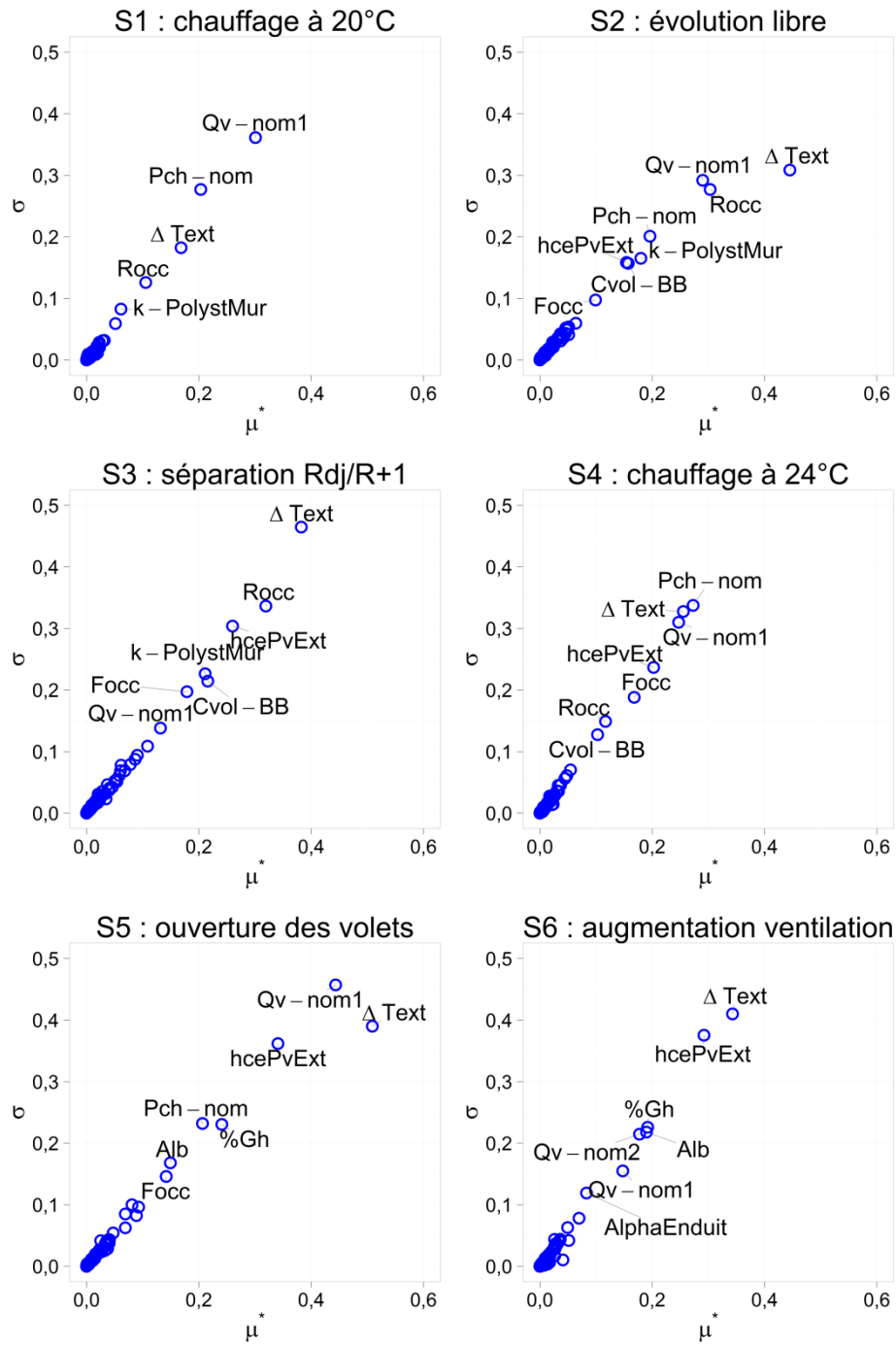


Figure 2-14. Graphiques de Morris ($\sigma; \mu^*$) pour les six scénarios du protocole expérimental (en °C)

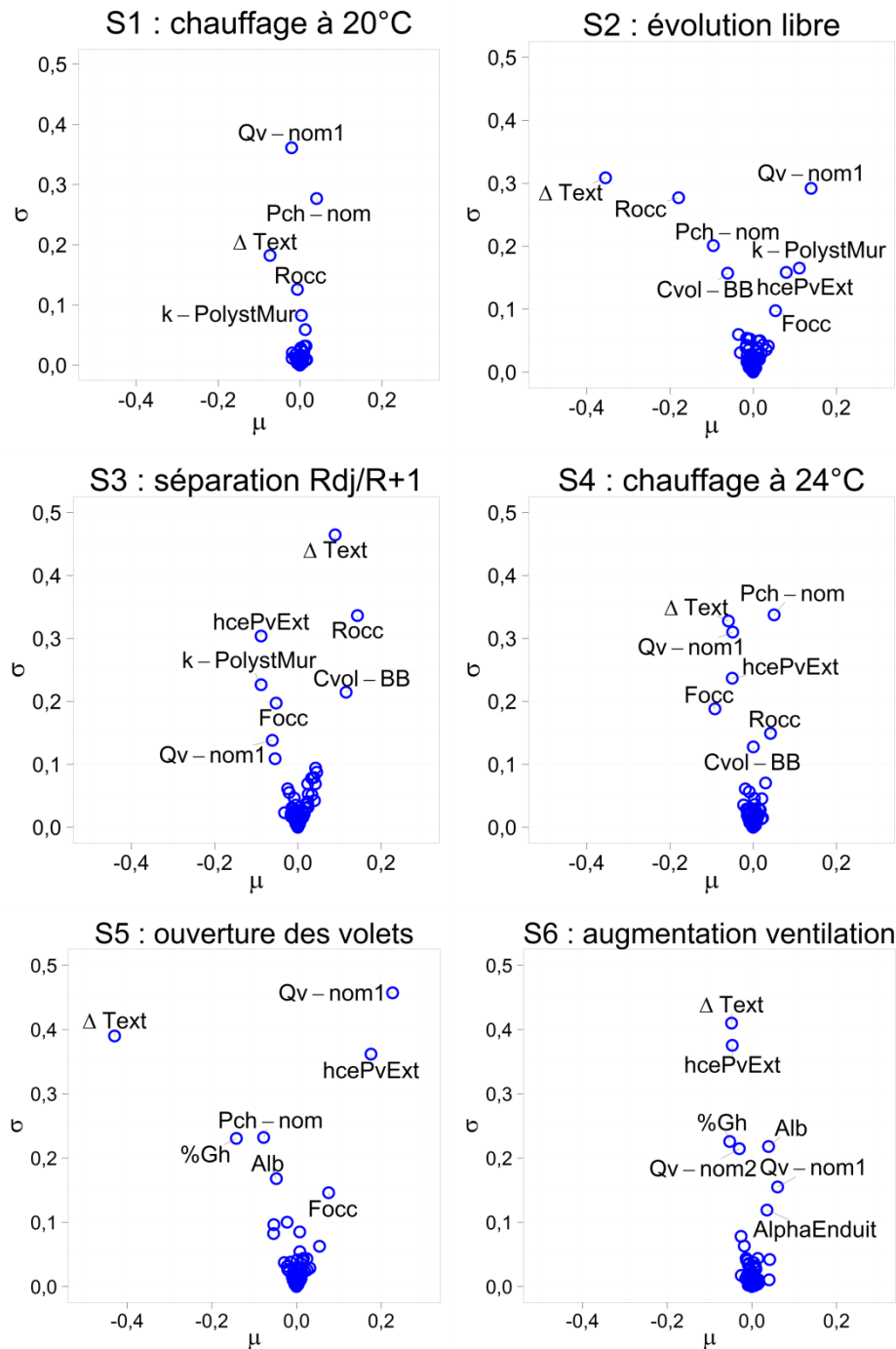


Figure 2-15. Graphiques de Morris ($\sigma; \mu$) pour les six scénarios du protocole expérimental (en °C)

Nous avons observé qu'un groupe relativement restreint de facteurs d'entrée se détachait des autres facteurs dont les effets peuvent être considérés comme négligeables. Pour mettre en place une sélection, l'ensemble des facteurs a été classé selon la distance. À partir de ces graphiques de Morris, la distance euclidienne d_j^* entre l'origine et le point (μ_j^*, σ_j) relatif à chaque facteur j

a ainsi été calculée sur chaque scénario s , puis normalisée selon l'équation (2.18) :

$$D_{j,s}^* = \frac{d_{j,s}^* - \min_j(d_{j,s}^*)}{\max_j(d_{j,s}^*) - \min_j(d_{j,s}^*)} \quad (2.18)$$

Le maximum des $D_{j,s}^*$ sur les six phases du protocole est alors choisi pour classer les facteurs. Les phénomènes physiques mis en avant dans chaque scénario étant différents, le but est de retenir tout facteur qui serait influent, ne serait-ce que sur une seule phase du protocole. La Figure 2-16 présente les 20 facteurs incertains les plus influents selon cette distance. Parmi ces vingt premiers paramètres, les onze premiers (en bleu) ont été retenus pour la propagation d'incertitudes, car se détachant des autres, et que leur nombre correspondait à une valeur compatible avec la mise en œuvre pratique d'une ASG. Il s'agit des facteurs : $P_{ch,nom}$ (puissance de chauffage nominale), $Q_{v,nom1}$ et $Q_{v,nom2}$ (bas et haut débits nominaux de renouvellement d'air), ΔT_{ext} (différence de température ajoutée à la température extérieure), $h_{cePvExt}$ (coefficient d'échanges superficiels extérieur des parois verticales), R_{occ} et F_{occ} (résistance thermique additionnelle et facteur d'occultation des volets roulants), Gh (pourcentage ajouté de rayonnement global horizontal), Alb (albédo), $\lambda_{polystMur}$ (conductivité thermique du polystyrène des parois verticales), C_{vol-BB} (capacité thermique volumique du béton banché).

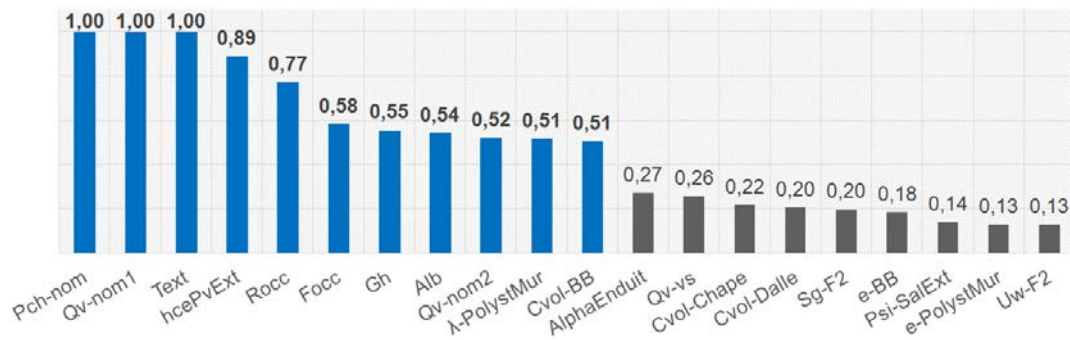


Figure 2-16. Classement des 20 facteurs incertains les plus influents selon $\max_k(D_{j,s}^*)$

2.4.2. Propagation d'incertitudes

La propagation des incertitudes réalisée, un ensemble de séries temporelles de températures simulées est disponible pour chaque zone. L'interprétation des résultats s'est concentré sur la zone séjour-cuisine, zone exposée sud et présentant la plus grande surface au sol. À chaque pas de temps fixé $k\Delta t$ ($k \in$

$\mathbb{N}^*$), le profil de distribution de ces températures peut être approché par une loi d'espérance $\mu_{i,k}$, et d'écart-type $\sigma_{i,k}$. La moyenne sur toutes les simulations des $\mu_{i,k}$ est une série temporelle, notée μ_k et représentée par la courbe C_μ . De manière similaire, C_σ est construite à partir des $\sigma_{i,k}$. La courbe C_μ est alors encadrée par les courbes $C_{\mu+2\sigma}$ et $C_{\mu-2\sigma}$ valant respectivement C_μ plus et moins deux fois C_σ . Cette bande d'incertitudes est comparée à celle fixée sur les mesures, correspondant à une enveloppe d'incertitudes de $\pm 1^\circ\text{C}$ (Spitz 2012) par rapport aux températures mesurées. Ces courbes sont présentées à la Figure 2-17 pour l'ensemble des six scénarios. La bande en rouge correspond aux mesures, et celle en bleu aux simulations.

Trois remarques principales sur l'allure générale peuvent être notées. Premièrement, un recouvrement partiel des bandes d'incertitudes associées aux mesures et aux simulations est observable. À aucun moment, lors des six scénarios du protocole expérimental, ne peut être constatée une disjonction entre ces deux enveloppes, ce qui aurait permis d'affirmer l'existence d'un biais significatif intrinsèque au modèle puisque, dans ce cas, les incertitudes n'auraient pu expliquer les écarts entre mesures et simulation. Or, ce n'est pas le cas ici. La seconde remarque pouvant être faite concerne la non-atteinte des consignes de température fixées dans les scénarios 1 et 4. La faible puissance de chauffage associée au by-pass de l'échangeur thermique expliquent pour une grande partie cette observation, outre le fait que la température extérieure a été particulièrement basse entre fin janvier et début février, soit durant le scénario 2. Enfin, relevons un pic de température à la toute fin du scénario 2. Cette hausse de température correspond à une journée ensoleillée où les volets ont été ouverts pendant quelques heures. Cette discordance avec le protocole a priori ayant été précisément consignée dans le « journal de bord », elle a pu être prise en compte dans les scénarios d'occultation en simulation, et il peut être observé que l'évolution de température prédite par le modèle est relativement proche de celle relevée par les mesures.

Concernant l'analyse scénario par scénario, nous pouvons dresser les constats suivants. Sur le scénario 1, la simulation semble surestimer la température intérieure, notamment au début du scénario. Cela peut probablement en partie provenir des hypothèses considérées à l'initialisation. L'énergie stockée dans le bâtiment durant les semaines précédentes a peut-être été surestimée, pouvant fournir une explication de ces températures simulées plus élevées que les mesures en début de scénario, tendance s'inversant à la fin du scénario 1, et se prolongeant pour les deux scénarios suivants. Sur les scénarios 2 et 3, une dynamique fortement similaire est effectivement observable entre simulation et mesure, avec des températures simulées très légèrement en deçà de celles mesurées. Les bandes d'incertitudes sont cependant quasiment confondues. Sur le scénario 4, les températures simulées s'élèvent plus rapidement que les

mesures et un décalage se crée. Une surestimation d'un degré Celsius environ est observable, les bandes d'incertitudes étant toutefois loin d'être disjointes. Sur le scénario 5 correspondant à l'ouverture des volets et un chauffage coupé, un recouvrement très fort entre les deux bandes d'incertitudes peut être constaté, et ce, dès le début du scénario. Les amplitudes journalières de variation des températures y augmentent sensiblement, et de manière fort logique avec le captage du rayonnement solaire par le bâtiment. Celles simulées sont légèrement plus réduites que celles des mesures (2,6 contre 3,4 °C). Enfin, sur le scénario 6, l'augmentation du débit de renouvellement d'air conduit à des résultats assez comparables au scénario précédent, à savoir des profils simulé et mesuré relativement proches avec des amplitudes plus faibles concernant les résultats de simulation. Dans la deuxième moitié du scénario, il convient malgré tout de noter que les températures simulées et mesurées s'éloignent progressivement (les simulations ont tendance à surestimer les mesures), même si la dynamique reste globalement bien reproduite.

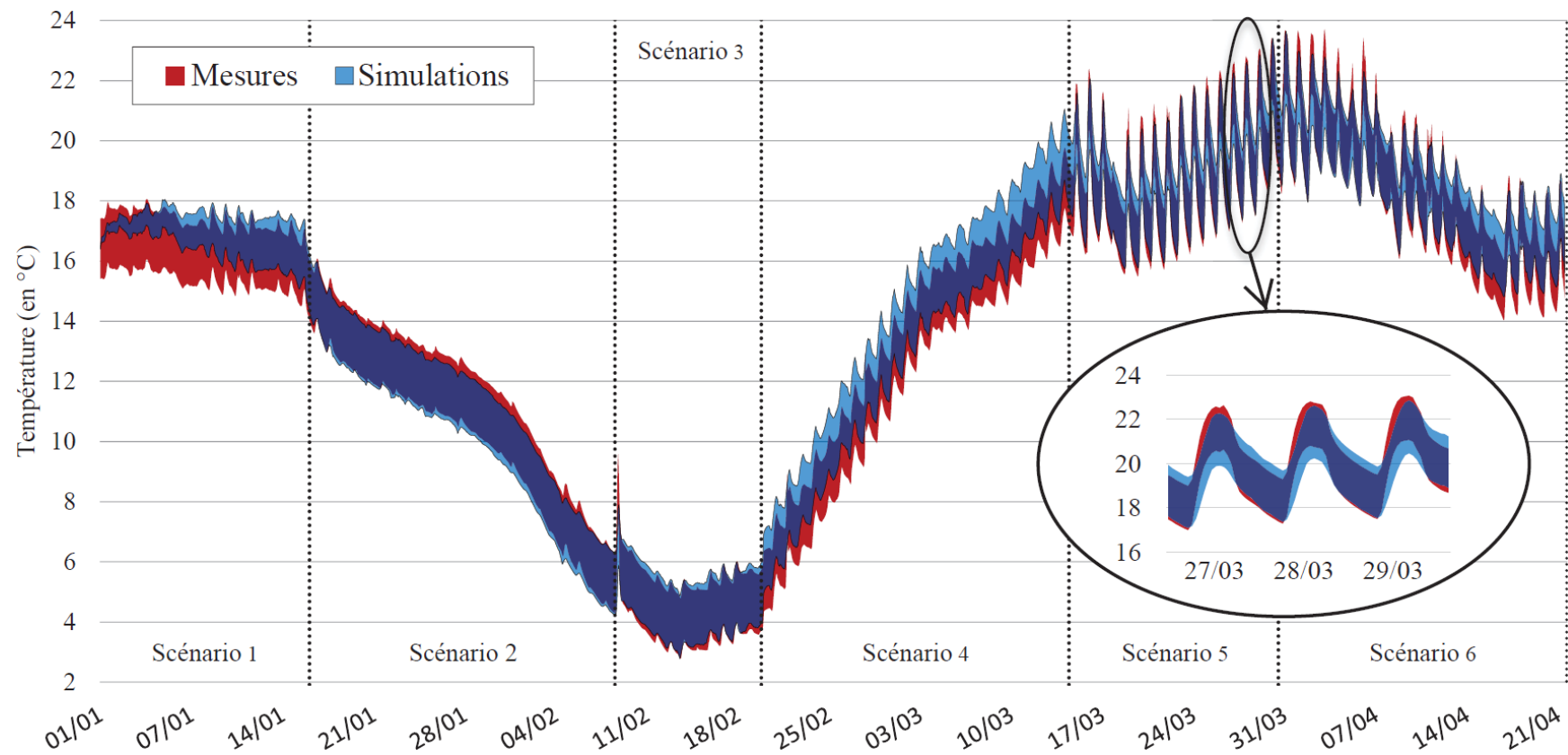


Figure 2-17. Bandes d'incertitudes des températures mesurées et simulés dans le séjour

Ces résultats ont été également interprétés sous un autre angle. Pour chaque période du protocole expérimental, les erreurs-types ($RMSE_s$) entre la série μ_k de la zone séjour et celle des mesures de cette même zone ont été calculées. Les résultats sont présentés à la Figure 2-18. Selon les scénarios, les valeurs de la RMSE se situent entre 0,22 et 0,83 °C. Les périodes où une consigne de température est imposée (scénarios 1 et 4) sont celles où les valeurs de la RMSE sont les plus élevées, confirmant l'interprétation graphique précédente.

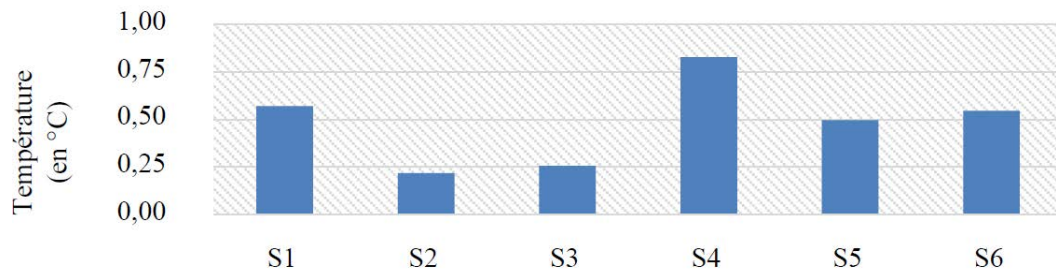


Figure 2-18. Valeurs de la RMSE entre la série et la courbe des mesures, pour les six scénarios du protocole expérimental.

À la suite de ces interprétations qualitative (Figure 2-17) et quantitative (Figure 2-18) des résultats, il peut être conclu que le modèle a présenté, dans le cadre de cette étude de cas, une relative bonne capacité de prédiction du comportement réel du bâtiment. Les écarts constatés sont comparables à ceux obtenus par Spitz et al. (2012) avec *EnergyPlus*, référence internationale dans le domaine, et une typologie de bâtiment similaire puisque ses travaux ont porté sur la maison INCAS double-mur, sœur jumelle de la maison béton-banché étudiée ici.

2.4.3. Analyse de sensibilité globale

Les résultats de l'analyse de sensibilité globale sont présentés dans les figures suivantes. La Figure 2-19 correspond à la valeur des indices de Sobol principaux, pour chacun des onze facteurs incertains étudiés, et sur les six scénarios du protocole expérimental. La Figure 2-20 est l'équivalent de la Figure 2-19 pour les indices de Sobol totaux.

Le premier commentaire pouvant être fait est que le facteur ΔT_{ext} présente une influence très majoritaire par rapport à l'ensemble des autres facteurs incertains considérés. Les valeurs des indices se situent autour de 0,5 pour les indices principaux, et autour de 0,8 pour les indices totaux. Ceci confirme qu'une connaissance fine de la température extérieure est nécessaire pour prévoir le comportement de ce type de bâtiments, fortement isolés et sensibles aux

sollicitations (externes en l'occurrence ici). Par ailleurs, plusieurs résultats déjà observés lors du criblage de Morris sont à nouveau observables. Pour le débit bas de ventilation Q_{v-nom1} , son influence est maximale lors des scénarios où la ventilation est active, et notamment pour le scénario 1, ce qui explique les valeurs élevées des indices (principal et total) lors du scénario 2, dû à un effet de persistance. Pour le débit haut de ventilation Q_{v-nom2} , la valeur de ses indices est non nulle uniquement sur le scénario 6, celui où ce débit est imposé. Comparativement, à l'influence estimée Q_{v-nom1} , celle de Q_{v-nom2} est moindre. Cela provient probablement du fait que dans ce dernier scénario, les volets sont ouverts, et que les facteurs liés aux apports solaires augmentent la variabilité globale sur les résultats, et diminuent *de facto* la part relative de variance expliquée par l'incertitude pesant sur Q_{v-nom2} . En effet, les facteurs $\%Gh$ et Alb présentent des valeurs d'indices de sensibilité totaux entre 0,05 et 0,1 environ pour les scénarios 5 et 6, alors qu'elles sont quasiment nulles sur les 4 premiers scénarios, lorsque les volets sont fermés. Malgré une connaissance relativement fine sur ce facteur, la valeur de ces indices de la puissance de chauffage $P_{ch,nom}$ atteint respectivement 0,2 et 0,1 environ sur les scénarios 1 et 4, correspondant à une activation du chauffage. Le fait que les consignes de température ne soient jamais atteintes durant ces périodes de montée en température du bâtiment explique, selon nous, une grande partie du caractère critique que présente ce facteur dans les résultats de cette analyse. Concernant les facteurs R_{occ} et F_{occ} leur influence est prépondérante lorsque les volets sont fermés, soit les quatre premiers scénarios. La résistance thermique des volets apparaît comme particulièrement explicative de la variance globale observée lorsque le bâtiment est laissé en évolution libre. Une explication peut être apportée en croisant cette influence avec celles observées pour les facteurs $\lambda_{polysMur}$ et C_{vol-BB} , également maximales à ces périodes. En effet, le chauffage et la ventilation étant coupés et les volets fermés, la résistance thermique des parois et l'inertie du bâtiment sont les facteurs majeurs pour régir l'énergie stockée dans le bâtiment, et donc l'évolution de la température. L'influence du facteur d'occultation est moins signifiante sur la variance globale observée, tout comme celle de la conductivité thermique du polystyrène des murs. L'épaisseur d'isolation élevée (20 cm) associée à une incertitude modérée, expliquent ce résultat. De manière assez surprenante, le facteur $h_{cePvExt}$ apparaît à nouveau comme relativement influent dans l'ASG. La vaste méconnaissance considérée ($\mu = 14,9 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ et $\sigma = 3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$) semble être l'une des raisons principales.

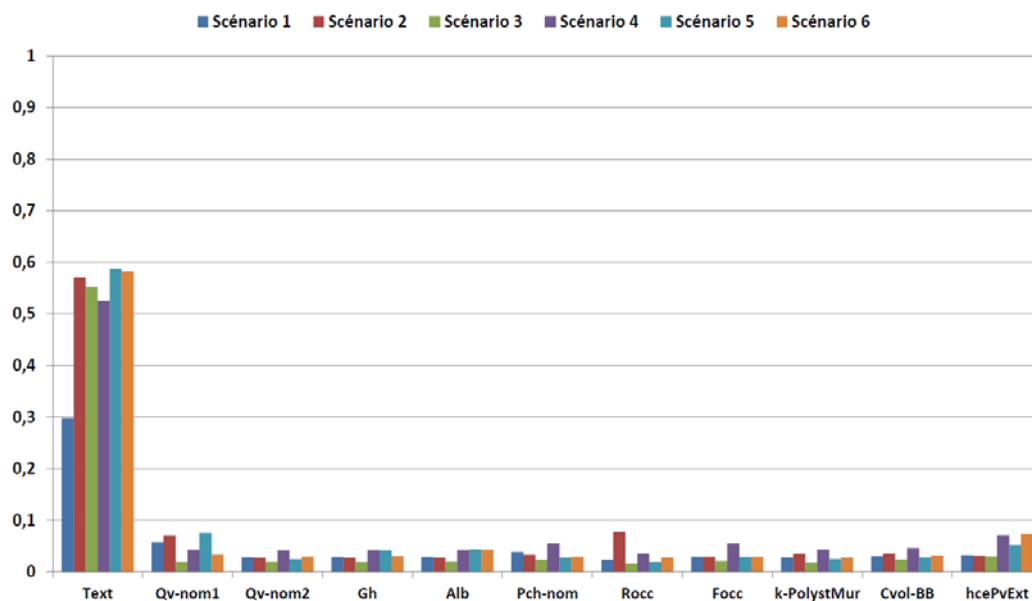


Figure 2-19. Indices de Sobol principaux, sur les six scénarios du protocole expérimental

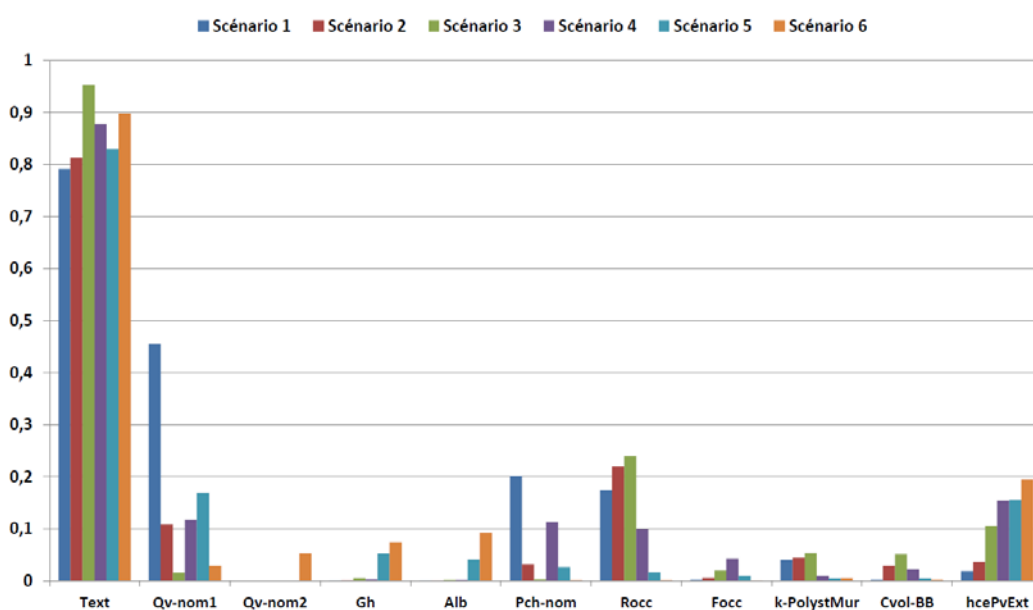


Figure 2-20. Indices de Sobol totaux, sur les six scénarios du protocole expérimental

2.4.4. Conclusion sur l'étude de cas

Dans le cadre de cette validation empirique menée sur une maison passive soumise à un protocole couvrant une période de quatre mois entre les mois de janvier et d'avril, les résultats obtenus tendent à montrer une relative bonne capacité du modèle à prédire le comportement réel du bâtiment. Malgré toute la prudence dont il faut faire preuve au regard des conclusions pouvant être faites à la suite d'un tel processus, cette étude de cas nous semble constituer un élément rassurant au sujet de la fiabilité du modèle pour simuler le comportement thermique dynamique de maisons à énergie positive, périmètre de travail de cette thèse. Par ailleurs, le criblage de Morris et l'analyse de sensibilité globale par le calcul des indices de Sobol a permis de mettre en évidence l'influence notable de certains facteurs souvent omis ou négligés par les modélisateurs (p. ex. la valeur de l'albédo).

2.5. CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre a dans un premier temps été l'objet d'un état de l'art sur les méthodes d'analyse de sensibilité et d'incertitude. Leur intérêt au regard du contexte de ces travaux de thèse a pu être montré, et les plus adaptées, sélectionnées. Ont ainsi été retenues, la technique du criblage de Morris pour réduire la combinatoire de l'espace de décision à explorer en amont de l'optimisation, et une propagation d'incertitudes par échantillonnage stratifié (LHS) pour évaluer le niveau d'incertitude de solutions optimales. L'état de l'art a également pu mettre en évidence la problématique essentielle de la fiabilité des modèles, notamment dans le contexte des bâtiments à haute performance énergétique. À cet effet, un soin particulier a été apporté pour justifier l'utilisation des modèles retenus et a conduit, dans un second temps, à la mise en œuvre d'une démarche de validation expérimentale de l'outil de simulation *COMFIE*. Cette partie applicative a également donné l'occasion d'illustrer l'utilisation des méthodes retenues et d'une méthode d'analyse de sensibilité globale. À travers ce chapitre a finalement pu être développé ce qui constituera l'étape amont et l'étape aval du processus d'optimisation de la démarche globale proposée, à savoir l'identification des paramètres de conception les plus influents pour réduire le nombre de combinaisons à évaluer en optimisation, et évaluer le degré de confiance dans les performances de solutions obtenues par optimisation.

Chapitre 3. Algorithme génétique pour l'optimisation multicritère

La démarche d'aide à la décision proposée dans ces travaux vise à s'appuyer sur l'optimisation multicritère pour identifier des concepts de bâtiments performants et décrire le plus largement possible les compromis accessibles au sein de l'espace de recherche. La nature du problème d'optimisation formulé – combinatoire et à fonctions dont l'expression analytique est difficilement accessible voire inaccessible – a conditionné le choix d'un algorithme stochastique, à savoir un algorithme génétique de type NSGA-II. Ce chapitre a pour objectif de présenter cet algorithme et ses mécanismes sous-jacents, de manière à permettre sa mise en œuvre dans le chapitre 5, chapitre applicatif de cette thèse. Dans une première partie, nous en présenterons les principes généraux avant de nous intéresser plus précisément aux moteurs guidant l'exploration de ce type d'algorithmes. La seconde partie de ce chapitre sera consacrée à la problématique du réglage des paramètres régissant ces processus, étape aussi appelée paramétrage et conditionnant pour beaucoup l'efficacité des algorithmes génétiques.

SOMMAIRE DU CHAPITRE 3

3.1. Introduction.....	147
3.2. Algorithmes évolutionnaires	147
3.2.1. Généralités.....	147
3.2.2. Définitions et vocabulaire.....	148
3.2.3. Mécanismes évolutionnaires de base.....	150
3.2.4. Choix d'un algorithme de type NSGA-II.....	162
3.2.5. Applications à la conception de bâtiments.....	169
3.2.6. Conclusion	170
3.3. Paramétrage	170
3.3.1. Problématique du paramétrage des algorithmes évolutionnaires.....	171
3.3.2. Indicateurs de qualité	177
3.3.3. Méthodes de paramétrage existantes	182
3.3.4. Méthodologie retenue.....	188
3.4. Conclusion du chapitre	194

3.1. INTRODUCTION

Comme le chapitre 1 l'a mis en évidence, l'écoconception de maisons à énergie positive, dans un contexte de développement durable, constitue un problème d'aide à la décision multicritère complexe. L'identification de concepts de MEPOS performants peut avantageusement être conduite par des techniques d'optimisation multicritère.

Métaheuristiques d'une grande flexibilité, les algorithmes génétiques et plus largement les algorithmes évolutionnaires, regroupant l'ensemble des techniques d'optimisation stochastiques inspirées de la théorie de l'évolution de Darwin, présentent l'avantage de ne nécessiter que la connaissance des valeurs des fonctions à optimiser aux points échantillonnés. Ces algorithmes sont donc particulièrement bien adaptés aux fonctions complexes comme celles basées sur les modèles de simulation énergétique dynamique, dont la régularité n'est *a priori* pas connue, et permettent une exploration globale de l'espace de recherche via la manipulation d'un ensemble de solutions admissibles du problème d'optimisation. En revanche, leur mise en œuvre requiert souvent un coût calculatoire important, et leur efficacité dépend d'un subtil équilibre entre aptitude à diversifier la recherche et aptitude à l'intensifier (dans les régions intéressantes de l'espace de recherche). Conditionner un algorithme opérationnel et adapté aux besoins formulés dans ces travaux nécessite ainsi une connaissance fine des mécanismes évolutionnaires.

3.2. ALGORITHMES ÉVOLUTIONNAIRES

3.2.1. Généralités

Les algorithmes évolutionnaires (AE) regroupent l'ensemble des méthodes d'optimisation stochastiques basées sur une transposition informatique simplifiée de la théorie de l'évolution de Darwin (1859), également appelé « Darwinisme artificiel » ou « évolution artificielle ». Le principe général de ce courant repose sur deux mécanismes : la sélection naturelle et la reproduction. Dans un environnement hostile, les individus les mieux adaptés d'une population auront davantage de chances de survie, et donc d'assurer une descendance (c'est la sélection naturelle). La reproduction permet, par échanges de matériel génétique entre les individus, de contribuer à la diversité de la population, et à l'adaptation graduelle des individus à leur environnement, au fil des générations.

Cette classe de méthodes a connu un réel essor à partir des années 1980, notamment grâce aux progrès informatiques. Aujourd'hui, les AE constituent un domaine de recherche actif ainsi qu'un vaste champ d'applications pour des problèmes réels difficiles dans de nombreux secteurs (mécanique des structures, biologie, traitement d'images, finance, planification, etc.).

Parmi ces méthodes peuvent être citées, entre autres, les algorithmes génétiques (Holland 1975), la programmation génétique (Koza 1992) ou les stratégies d'évolution (Hoffmeister et Bäck 1990). Dans cette famille, les algorithmes génétiques (AG) sont les plus connus, l'ouvrage de référence de (Goldberg 1989) ayant largement contribué à leur popularisation. Le présent chapitre est focalisé sur cette dernière catégorie d'algorithmes. À noter également l'ensemble des algorithmes hybrides, alliant les AE à d'autres catégories d'algorithmes pour créer des associations avantageuses.

Pour un panorama plus détaillé sur le Darwinisme artificiel, le lecteur pourra se référer à la revue de Lutton (2004) sur ce sujet.

3.2.2. Définitions et vocabulaire

Nous venons de le voir, les algorithmes génétiques sont directement inspirés de la biologie, et plus particulièrement de la génétique à laquelle ils empruntent également le vocabulaire. Avant de décrire en détails le fonctionnement d'un algorithme génétique, nous proposons ici de préciser ce vocabulaire avec plusieurs définitions.

En optimisation évolutionnaire, un **individu** correspond à une solution admissible du problème d'optimisation considéré, appartenant à l'espace de recherche appelé **environnement**. Rappelons que, dans ce manuscrit comme couramment ailleurs, le terme de solution admissible est confondu, par raccourci de langage, avec celui de solution. Dans notre contexte, un individu représente un concept de maison à énergie positive.

Une **population** est un ensemble d'individus, donc de solutions potentielles du problème d'optimisation. Rappelons également que les AG appartiennent à la catégorie des métaheuristiques distribuées dont la particularité est de manipuler, à chaque itération de l'algorithme, un ensemble de solutions de l'espace de recherche. En poursuivant l'analogie sémantique, une **génération** correspond alors à une itération algorithmique.

Le patrimoine génétique de chaque individu est contenu dans un ou plusieurs **chromosomes** où l'information permettant de décrire chaque individu est codée sur des **gènes**, correspondant aux variables de décision du problème

d'optimisation. Dans notre contexte, les gènes représentent les caractéristiques des concepts de bâtiments étudiés, par exemple l'épaisseur d'isolation des murs.

Chacun de ces gènes porte un **allèle** donné, correspondant à un état (le plus souvent une valeur discrète ou continue) de la caractéristique représentée par ce gène. Plusieurs allèles sont généralement associés à un même gène. Il pourrait s'agir de différents niveaux d'épaisseur d'isolation (10 cm, 15 cm, 20 cm, etc.) pour reprendre l'exemple précédent. Ces différentes versions alléliques d'un même gène peuvent être codées via des chaînes d'éléments binaires appelés **bits**, ne prenant que deux valeurs, 0 et 1. La Figure 3-1 illustre les cinq niveaux classiques d'organisation d'un algorithme génétique.

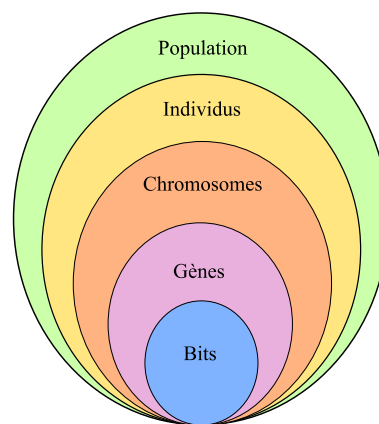


Figure 3-1. Les différents niveaux d'organisation dans un algorithme génétique, d'après Souquet et Radet (2004)

La Figure 1-17 propose, quant à elle, une illustration de la représentation d'un bâtiment en optimisation évolutionnaire, dans le cas d'un chromosome.

Pour finir, notons que l'information génétique contenue dans l'ensemble des chromosomes peut être appelée **génotype**, et l'expression de ce génotype dans l'espace des fonctions objectifs, **phénotype**. Dans notre contexte, le génotype d'un bâtiment correspondrait aux valeurs de ses caractéristiques tandis que son phénotype représenterait la ou les valeurs de ses performances.

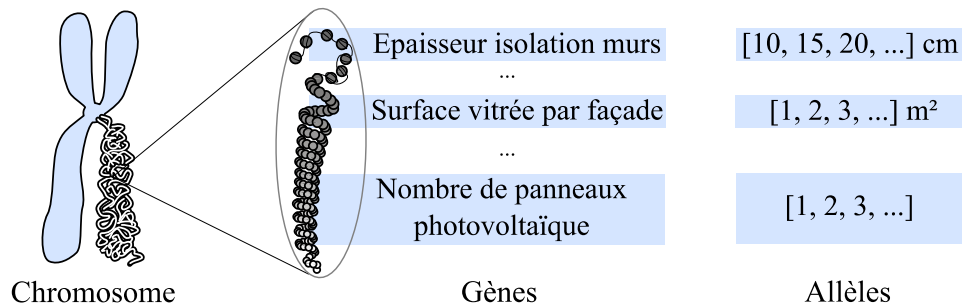


Figure 3-2. Illustration de la représentation d'un bâtiment en optimisation évolutionnaire dans le cas d'un chromosome.

3.2.3. Mécanismes évolutionnaires de base

Les notions de vocabulaire nécessaires à la description des AE ayant été introduites, nous proposons à présent dans cette section une synthèse des principes généraux sur lesquels se fonde le fonctionnement général de ces algorithmes. L'objectif des algorithmes évolutionnaires est de reproduire sommairement la génétique naturelle, en imitant les facultés d'une population d'individus à évoluer au fil des générations pour s'adapter à la pression imposée par son environnement. Informatiquement, l'adaptation graduelle d'une population est gérée au sein d'une boucle générationnelle (§ 3.2.3.1). Selon la représentation du génotype (§ 3.2.3.2), des opérateurs génétiques (§ 3.2.3.3) et des procédures de sélection (§ 3.2.3.4) permettent d'engendrer la population à la génération suivante.

3.2.3.1. BOUCLE GÉNÉRATIONNELLE

Le principe général de fonctionnement d'un algorithme évolutionnaire repose sur le déroulement d'une boucle générationnelle, illustrée Figure 3-3, et composée de quatre étapes :

1. la sélection pour reproduction ;
2. la reproduction ;
3. l'évaluation ;
4. et la sélection pour le remplacement.

Une étape préliminaire d'initialisation précède cette boucle générationnelle, et sa poursuite est conditionnée à un critère d'arrêt, évalué à chaque itération après l'étape 4.

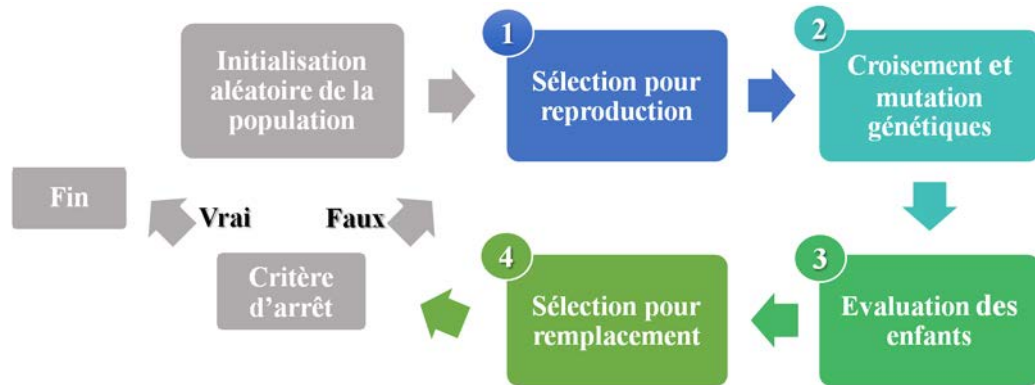


Figure 3-3. Principe général de fonctionnement des algorithmes évolutionnaires

L'**initialisation** consiste habituellement à créer aléatoirement une population de μ individus. Comme décrit dans le chapitre 2, différentes stratégies d'échantillonnage sont envisageables. Lutton (2004) signale par ailleurs qu'à cette étape, il est souvent intéressant d'injecter le maximum de connaissances *a priori* du problème. Placer dans la population initiale des individus apportant des informations sur les solutions optimales recherchées peut effectivement permettre d'accélérer significativement la convergence de l'algorithme en pratique.

Suite à la création d'une population initiale de μ individus, la **sélection pour reproduction** consiste à détecter et sélectionner les λ individus de la population courante qui seront autorisés à se reproduire. Ces individus sont appelés les « parents », et sont retenus en fonction de leur phénotype, c'est-à-dire leur performance au regard des critères d'optimisation. Plusieurs schémas de sélection existent, et seront présentés au § 3.2.3.4. Intuitivement, il peut être compris que plus la pression de l'environnement sur la population est élevée, plus les individus les mieux adaptés de la population seront les seuls à survivre. Cette notion est appelée *pression de sélection* ou *pression sélective*, et régit la vitesse avec laquelle l'algorithme va intensifier la recherche autour des meilleures solutions courantes.

La seconde étape de la boucle générationnelle, la **reproduction**, correspond à la génération des descendants (« les enfants ») des parents. Le plus souvent, λ enfants sont obtenus à partir des λ parents. La reproduction s'effectue à partir des opérateurs génétiques de croisement et de mutation. Le croisement permet une transmission du patrimoine génétique, tandis que la mutation contribue à la diversité par des perturbations du génome. Ces opérateurs stochastiques dépendent de deux paramètres, la probabilité de croisement p_c et la probabilité de mutation p_m (§ 3.2.3.3).

L'étape d'**évaluation** consiste tout simplement à calculer (voire estimer) le phénotype des λ enfants générés, i.e. la ou les performances de ces solutions.

Pour rappel, aucune hypothèse n'est requise sur la ou les fonctions d'évaluation, et seule la valeur de ces fonctions aux points échantillonnés est nécessaire.

La quatrième étape correspond à la **sélection pour le remplacement** dont le but est d'engendrer la population de la génération suivante. Différentes stratégies sont possibles, la plus simple étant de remplacer tous les parents par l'ensemble des enfants, même si cela est relativement inefficace (Lutton 2004). Généralement, la sélection s'opère plutôt entre les μ individus de la population courante et les λ enfants générés, de manière à conserver en mémoire au moins une part des meilleurs individus existants. L'analogie avec la biologie trouve ici une de ses limites, les AE autorisant dans ce cas des individus à perdurer sur plusieurs générations.

Les itérations de la boucle générationnelle sont stoppées par le respect d'un **critère d'arrêt**. La gestion de l'arrêt du processus d'optimisation est fondamentale en pratique puisqu'un arrêt précoce ne permettra pas à l'algorithme de converger vers le ou les optimums du problème alors qu'un arrêt tardif pénalisera la durée du processus par la réalisation de calculs additionnels superflus. En l'absence d'information sur l'optimum recherché, une pratique courante est de fixer *a priori* un nombre limite d'itérations, ce qui permet de contrôler le temps accordé à l'exécution du processus. En revanche, ce critère ne donne aucune garantie sur la qualité finale des solutions obtenues. Des critères basés sur la vitesse de convergence ou sur la dispersion de la population peuvent répondre à cette difficulté. Être capable de stopper le processus d'optimisation au « bon » moment participe bien évidemment de manière importante à l'efficacité de la démarche.

Les algorithmes évolutionnaires nécessitent plusieurs paramètres internes (taille de la population courante, probabilités de croisement et de mutation, pression de sélection, et proportion de remplacement) qu'il est délicat et pourtant essentiel de régler pour disposer d'un algorithme efficace. La seconde partie de ce chapitre (partie 3.3) sera consacrée à cette problématique.

3.2.3.2. REPRÉSENTATIONS

L'information stockée dans les gènes peut être codée selon différentes représentations, conditionnant le choix des opérateurs génétiques utilisés. Les deux représentations classiques correspondent aux représentations binaire et réelle. La **représentation binaire** consiste à coder l'information avec l'alphabet $\{0,1\}$ sur des chaînes de longueur donnée. Elle permet de représenter un ensemble discret en un nombre fini de 2^l valeurs, l étant la longueur de la chaîne, et peut également être étendue à un espace de recherche réel en supposant une discrétisation de ce dernier. La recherche, par le biais des opérateurs génétiques, aura ainsi lieu sur les différents bits de chaque chaîne de binaires. À

l'inverse, la **représentation réelle** ou continue propose une recherche directement sur des nombres réels, ce qui nécessite des opérateurs différents si une discrétisation de l'espace n'est pas considérée. Historiquement, le **codage de l'information** a distingué les algorithmes génétiques (construits sur une représentation binaire puis discrète des solutions) des stratégies d'évolution (fondées sur une représentation continue ou réelle des solutions), même si depuis, ces approches ont convergé l'une vers l'autre, et la nuance est devenue beaucoup plus ténue. La Figure 3-4 propose une illustration d'un codage binaire sur 5 bits du nombre 10 (gène A), d'un codage sous la forme d'un entier du nombre 3 (gène C), et d'une représentation continue du nombre réel 8,5483 (gène X).

Sans les développer, citons d'autres possibilités de représentation, comme le code de Gray (code en base binaire dont la particularité est qu'un seul bit diffère entre un élément et le suivant) ainsi que les représentations par arbre (pour la programmation génétique) et par grammaire (pour l'évolution grammaticale) présentées par Lutton (2004).

De manière générale, le choix d'une représentation de l'espace de recherche doit correspondre à la structure de ce dernier, notamment lorsqu'il possède une structure particulière qui pourrait être avantageusement exploitée par une représentation. Par exemple, pour le célèbre problème du voyageur de commerce, l'alphabet $\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$, avec v_i représentant la i -ème ville, pourrait être utilisé à la place du codage binaire.

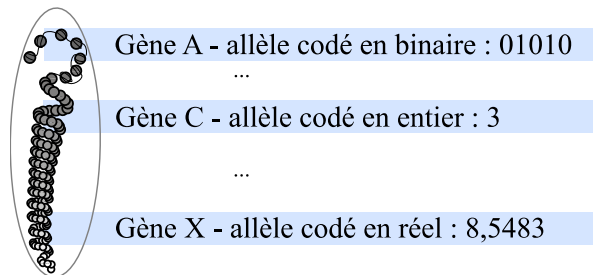


Figure 3-4. Illustration d'un codage binaire (gène A), d'un codage sous la forme d'un nombre entier (gène C) et d'un codage sous la forme d'un nombre réel (gène X)

3.2.3.3. OPÉRATEURS GÉNÉTIQUES

Les opérations génétiques, également appelés opérateurs de variation, permettent de manipuler le patrimoine génétique d'une population d'individus par croisement et mutation génétiques. Les variations qu'ils opèrent sont directement fonction de la représentation de l'information choisie. Dans cette section, nous proposons de présenter les opérateurs les plus classiques. Pour

davantage de détails sur les opérateurs génétiques existants, le lecteur pourra se référer à la revue réalisée par Ben Hamida (2001) dans son manuscrit de thèse.

❖ **Opérateurs de croisement**

Les opérateurs de croisement ont pour objectif d'imiter, au cours de la reproduction, la transmission du matériel génétique d'individus à leurs descendants. Si les enfants ne sont généralement pas l'exacte copie de leurs parents, ils partagent néanmoins un génotype proche. Ainsi, le croisement peut être globalement considéré comme un mécanisme permettant d'intensifier la recherche autour des solutions courantes.

En représentation binaire (et par extension, en représentation discrète), trois opérateurs classiques, illustrés Figure 3-5, peuvent être présentés :

1. le croisement binaire à un point de coupure ;
2. le croisement binaire à deux points de coupure ;
3. et le croisement uniforme.

Ces opérateurs sont appliqués à l'échelle du gène au regard d'une probabilité de croisement p_c donnée (un tirage aléatoire dans une loi uniforme entre 0 et 1 est effectué, et si ce nombre tiré est inférieur à p_c , alors le croisement aura lieu).

Le **croisement à un point de coupure** consiste, si celui-ci se produit, à :

- tirer aléatoirement un point de coupure situé entre deux bits de la chaîne binaire codant l'allèle du gène correspondant ;
- et échanger les chaînes de binaires des parents autour de ce point de coupure pour former les gènes des enfants.

Pour prendre l'exemple illustré à la Figure 3-5, un point de coupure a été tiré entre le bit n° 3 et le bit n° 4. Avant ce point, l'enfant 1 hérite de l'information génétique du parent 1, et après ce point, du parent 2. Et inversement pour l'enfant 2.

Le **croisement à deux points de coupure** consiste également à un échange des chaînes de codes, mais autour de deux points de coupure.

Le **croisement uniforme** correspond enfin à un croisement généralisé à multipoints de coupure. Le processus de construction du génotype des enfants peut être vu comme suit : pour chaque bit de l'enfant 1, un tirage aléatoire est réalisé pour savoir si ce dernier va emprunter l'information génétique du parent 1 ou du parent 2. L'enfant 2 est alors généré avec les choix opposés de l'enfant 1. Ce « brassage » génétique à l'intérieur des gènes conduit généralement à disposer chez les enfants, d'allèles inédits par rapport à celles des parents.

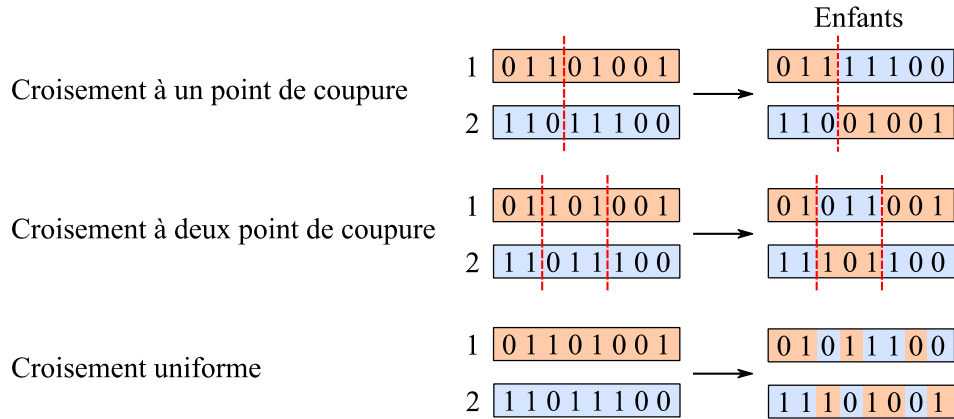


Figure 3-5. Illustration des croisements binaires classiques

En représentation réelle, les croisements binaires peuvent être adaptés en les faisant opérer non plus à l'échelle du gène, mais à l'échelle du chromosome. Illustrés Figure 3-6 dans le cas d'un croisement à un point de coupure, ces croisements consistent alors en un échange inter-gènes et non plus intra-gènes du matériel génétique. Ils sont nommés **opérateurs de croisement discrets**. Au contraire des croisements binaires, les allèles des enfants correspondent toujours à celles des parents, et la diversité génétique générée peut ainsi être considérée comme moindre.

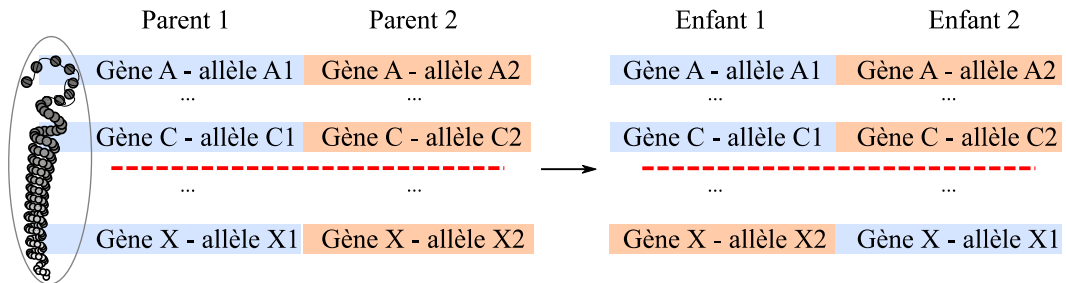


Figure 3-6. Illustration de l'adaptation des croisements binaires en croisements discrets, cas d'un croisement à un point de coupure

Des opérateurs spécifiques à la représentation continue existent, et permettent un mélange plus profond des génotypes en agissant à l'échelle du gène, à l'instar des croisements binaires en représentation génétique. Parmi eux, le **croisement arithmétique ou barycentrique** (BLX) et sa version étendue (BLX- α), permettent de générer un enfant $c(i)$ à partir de deux parents $p_1(i)$ et $p_2(i)$ via l'équation (1.1) :

$$c(i) = p_1(i) + \beta[p_2(i) - p_1(i)] \quad (3.1)$$

avec :

- β une variable aléatoire uniforme comprise dans l'intervalle $[-\alpha, 1 + \alpha]$;
- α un paramètre réel positif ou nul de cet opérateur fixé par l'utilisateur ;

- i l'indice du gène i à croiser.

Pour $\alpha = 0$, la version originelle de ce croisement, l'enfant engendré se situera obligatoirement à l'intérieur de l'intervalle défini par les deux parents, ce qui n'est plus le cas pour la version étendue ($\alpha > 0$). Eshelman et Schaffer (1993) ont montré que sur une série de problèmes tests, la valeur $\alpha = 0,5$ garantissait les meilleures performances.

Le **croisement binaire simulé** (SBX), proposé par Deb et Agrawal (1995), reprend le principe du croisement binaire à un point de coupure. À partir de deux parents $p_1(i)$ et $p_2(i)$ ce croisement génère deux enfants $c_1(i)$ et $c_2(i)$ par le biais de la relation (3.2) :

$$\begin{cases} c_1(i) = 0,5 \times [(1 + \beta_q) \times p_1(i) + (1 - \beta_q) \times p_2(i)] \\ c_2(i) = 0,5 \times [(1 - \beta_q) \times p_1(i) + (1 + \beta_q) \times p_2(i)] \end{cases} \quad (3.2)$$

avec :

- $\beta_q = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta+1}}, & \text{si } u < 0,5 \\ \left(\frac{1}{2 \times (1-u)}\right)^{\frac{1}{\eta+1}} & \text{sinon} \end{cases}$;
- u une variable aléatoire uniformément répartie dans l'intervalle $[0,1]$;
- η un paramètre réel non négatif qui caractérise la forme de la distribution des enfants par rapport aux parents.

La Figure 3-7 reprend une illustration dans Beyer et Deb (2001), montrant la distribution de probabilité pour la génération des enfants, avec deux valeurs de η (2 et 5). Un des aspects de ce croisement est que la dispersion des enfants est proportionnelle à celle des parents. Cela permet de faire évoluer le processus d'exploration au cours de la recherche. Par exemple, à l'initialisation, les solutions sont placées aléatoirement dans l'espace, et potentiellement éloignées les unes des autres. La dispersion des enfants sera alors forte, ce qui est compatible avec l'objectif du début de la recherche, à savoir explorer de manière vaste l'espace et identifier des régions d'intérêt. Au contraire, à la fin de la recherche, l'objectif est d'intensifier la recherche autour des meilleures solutions trouvées, potentiellement proches les unes des autres. L'opérateur SBX générera alors des enfants avec une dispersion faible, ce qui est compatible avec l'objectif souhaité.

De nombreux autres opérateurs existent. Citons l'extension du SBX avec une distribution log-normale (SBX-l) proposée par Raghuwanshi et al. (2004), le croisement génétique reproducteur (BGX) ou encore le croisement de Davis (1985), opérateur adapté pour le croisement de permutations.

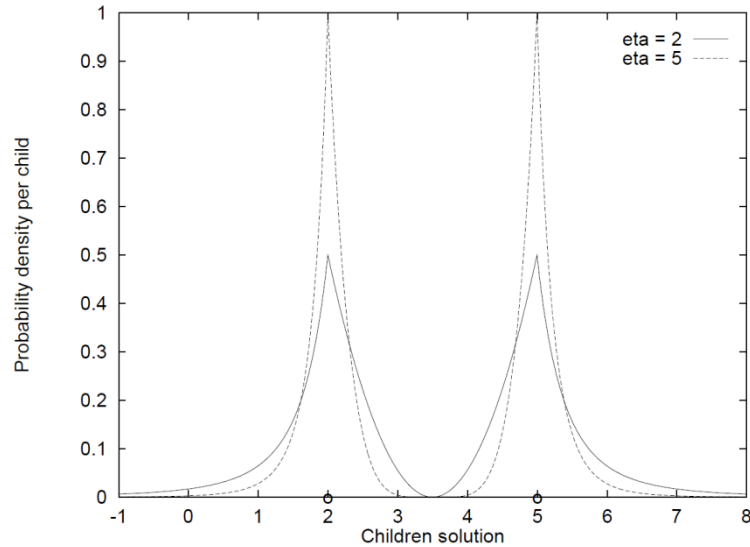


Figure 3-7. Distribution de probabilité pour la génération des enfants ; les parents sont marqués par un « o », tirée de Beyer et Deb (2001)

❖ Opérateurs de mutation

Les opérateurs de mutation ont pour objectif d'imiter, au cours de la reproduction, les légères perturbations aléatoires de l'information génétique dans le génome. Ces modifications impliquent généralement la génération d'enfants aux phénotypes inédits. Dans ce sens, la mutation peut être considérée comme un mécanisme permettant de diversifier l'exploration de l'espace de recherche. En représentation binaire (et par extension, en représentation discrète), la mutation consiste à inverser un bit aléatoirement choisi dans une séquence de nombres binaires. Un exemple est fourni Figure 3-8.

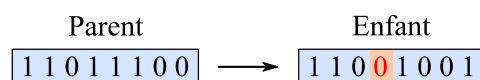


Figure 3-8. Illustration d'une mutation binaire survenue sur le bit n° 4

Dans l'ouvrage collectif dirigé par Siarry (2014), deux mutations classiques sont présentées : la **mutation déterministe** et la **mutation « bit-flip »**. Dans la mutation déterministe, un nombre fixé *a priori* de bits choisis aléatoirement sont inversés, alors que dans la mutation « bit-flip » chaque bit peut potentiellement muter avec une probabilité faible, généralement fixée à $1/l$, avec l la longueur de la chaîne de binaires. La mutation « bit-flip » peut être rapprochée du croisement uniforme, où un point de coupure peut être potentiellement retenu entre chaque bit.

En représentation continue, une adaptation de la mutation binaire peut être effectuée, dans le même esprit que les opérateurs de croisement discrets. Cette **mutation** appelée **discrète** consiste à choisir au hasard un gène, et à remplacer

aléatoirement l'allèle existant par une autre valeur allélique. Plus classiquement, les opérateurs les plus classiques en représentation réelle sont (Siarry 2014) :

- la mutation uniforme ;
- la mutation gaussienne ;
- et la mutation gaussienne auto-adaptative.

Dans la **mutation uniforme**, un nombre tiré aléatoirement dans une loi uniforme bornée vient prendre la place du précédent. Cette façon de muter permet de conserver une diversité plutôt élevée au sein de la population.

La **mutation gaussienne** reprend le principe de la mutation uniforme, mais avec une loi normale d'espérance la valeur précédente. La forme la plus générale de ce bruit gaussien peut s'exprimer via la relation (3.3) :

$$C_i = P_i + \sigma \mathcal{N}(0, C) \quad (3.3)$$

avec :

- P_i , le parent i ;
- C_i , l'enfant du parent i ;
- σ : l'écart-type, appelé aussi *pas de mutation* ;
- $\mathcal{N}(0, C)$: un tirage de loi normale centrée de matrice de covariance C (symétrique, définie positive).

Tout l'enjeu réside dans le choix des paramètres σ et C , ce qui constitue une opération délicate. Par exemple, si σ a une valeur trop élevée, l'intensification de la recherche sera pénalisée, tandis que si elle est trop faible, la diversification de la recherche sera limitée.

La **mutation gaussienne auto-adaptative** vise à considérer ces paramètres de mutation comme des variables supplémentaires à gérer par l'algorithme évolutionnaire, et les faire également évoluer par croisement et mutation. Plusieurs cas existent selon la complexité du modèle de covariance (cas isotrope, cas non-isotrope, cas général dit corrélé). Dans le cas le plus simple, le cas isotrope, tous les individus ont le même σ (soit $C = Id$) et la mutation consiste à tout d'abord muter σ selon une loi log-normale, puis à muter les individus à partir de la nouvelle valeur de σ , selon la relation (3.4) :

$$\begin{cases} \sigma' = \sigma \times e^{\tau \times \mathcal{N}_0(0,1)} \\ C_i = P_i + \sigma \times \mathcal{N}_i(0,1) \end{cases} \quad (3.4)$$

avec :

- σ' : la nouvelle valeur (ou valeur mutée) de σ ;
- et $\mathcal{N}_i(0,1)$ des réalisations indépendantes de variables aléatoires gaussiennes centrées de variance 1, pour i allant de 0 à N , le nombre d'individus.

Pour davantage de détails, le lecteur pourra par exemple se référer à (Schwefel 1981), l'un des pionniers des stratégies d'évolution.

3.2.3.4. STRATÉGIES DE SÉLECTION

Les stratégies de sélection sont utilisées lors des étapes n° 1 et n° 4 de la boucle générationnelle, correspondant aux sélections pour la reproduction et le remplacement. De même que pour les sections précédentes, nous proposons ici une synthèse non exhaustive des principales stratégies de sélection mises en œuvre dans les AE.

❖ Notion de pression de sélection

L'enjeu majeur lors de la sélection est de contrôler la vitesse d'intensification de la recherche autour de meilleures solutions courantes. Cette notion, introduite précédemment, est appelée *pression de sélection* ou *pression sélective* dont une première définition a été donnée par Goldberg et Deb en 1991 avec le temps de domination τ^* (« *takeover time* »), correspondant au nombre de générations nécessaire au remplissage de la population par des doublons du meilleur individu sous l'action des seuls opérateurs de sélection. Lutton (2004) appréhende cette notion comme, globalement, le « [...] quotient de la probabilité de sélection du meilleur individu sur la probabilité de sélection de l'individu moyen de la population courante ». Il existe plusieurs manières de définir, et formaliser cette notion, comme par exemple l'*intensité de sélection* (Siarry 2014).

❖ Remplacement d'une population

Pour constituer la population de la génération suivante, les AG ont historiquement mis en œuvre un remplacement générationnel. Le **remplacement générationnel** consiste tout simplement à remplacer l'ensemble des parents de la génération courante par tous les enfants, et uniquement eux ; de fait : $\mu = \lambda$. Néanmoins, ce type de remplacement est peu efficace, car il ne permet pas de garder en mémoire, au moins sur quelques générations, les meilleurs individus générés. Dans ce contexte, des approches visant à composer la nouvelle population avec les individus de la population courante et les enfants ont été développées. Si des parents peuvent être éliminés au hasard, des stratégies de sélection faisant intervenir le niveau d'adaptation des individus sont privilégiées. Nous proposons de présenter les principales stratégies de sélection existantes, en soulignant bien que certaines sont plutôt utilisées pour l'étape de sélection pour le remplacement, et d'autres plutôt pour l'étape de sélection pour la reproduction (§ 3.2.4.3).

❖ Principales stratégies de sélection existantes

La **sélection proportionnelle** consiste à mener un tirage aléatoire biaisé par des probabilités proportionnelles aux performances des individus. Le nombre espéré de sélections d'un individu i , noté λ_i , peut être défini selon la relation (3.5) :

$$\lambda_i = \frac{\lambda}{\sum_{k=1}^{\mu} \mathcal{F}_k} \times \mathcal{F}_i \quad (3.5)$$

avec :

- λ : le nombre d'individus à remplacer dans la population courante ;
- $\mathcal{F}_k$: la valeur de la performance de l'individu k , positive et à maximiser.

La sélection proportionnelle s'applique généralement dans le cas monocritère, même si des adaptations au cas multicritère existent tels que l'algorithme VEGA « *Vector Evaluated Genetics Algorithms* » de Schaffer (1985). Par ailleurs, cette sélection n'est utilisée que pour la reproduction, et présente des difficultés pour maîtriser la pression de sélection au cours de l'évolution. En effet :

- au début de la recherche, il se pourrait qu'il y ait un individu à très haute performance par rapport aux autres, ce qui aurait alors tendance à concentrer directement et de manière quasiment unique la recherche vers cet individu ;
- vers la fin de la recherche, la population est en train de converger, et il se pourrait qu'il y ait des individus présentant des performances proches, ce qui entraînerait alors une recherche pratiquement aléatoire, et ralentirait significativement la convergence finale de l'algorithme.

La méthode de **scaling** permet de pallier cet obstacle, en opérant une transformation linéaire de la fonction $\mathcal{F}$ évaluant la performance des individus (Lutton 2004). L'objectif est, sur la population courante, d'étalonner la fonction transformée $\mathcal{F}'$ de manière à ce que son maximum corresponde à C fois sa moyenne, avec C représentant une mesure de la pression de sélection (Goldberg 1989). Lutton (2004) indique par ailleurs que C est généralement pris entre 1,2 et 2. Le nombre espéré de sélections de l'individu i s'exprime alors selon la relation (3.6) :

$$\lambda_i = \frac{\lambda}{\sum_{k=1}^{\mu} \mathcal{F}'_k} \times \mathcal{F}'_i \quad (3.6)$$

avec les expressions de (3.7) :

$$\begin{cases} \mathcal{F}' = a \times \mathcal{F} + b \\ a = \frac{(C - 1) \times \mathcal{F}_{moy}}{\mathcal{F}_{max} - \mathcal{F}_{moy}} \\ b = \frac{\mathcal{F}_{moy} \times (\mathcal{F}_{max} - C \times \mathcal{F}_{moy})}{\mathcal{F}_{max} - \mathcal{F}_{moy}} \end{cases} \quad (3.7)$$

et où $\mathcal{F}_{moy}$ et $\mathcal{F}_{max}$ correspondent respectivement aux valeurs moyenne et maximale de la performance (évaluée selon $\mathcal{F}$) de la population courante. Ces valeurs sont à recalculer à chaque génération pour permettre d'opérer à nouveau la transformation linéaire.

Deux autres méthodes classiques permettent un contrôle de la pression de sélection :

- la sélection par rang ;
- et la sélection par tournoi.

La **sélection par rang** consiste à attribuer une probabilité de sélection proportionnelle au rang de chaque individu au sein de la population classée par ordre de performance décroissant (Lutton 2004). Outre cette sélection probabiliste, la sélection par rang peut aussi renvoyer à une stratégie de sélection déterministe (Dréo et al. 2003), basée sur un classement par rang de dominance. Cette notion est illustrée Figure 3-9, pour la relation de dominance de Pareto, définie en 1.3.2.1. Pour rappel, le front de Pareto correspond à l'ensemble des solutions non-dominées (au sens de la relation de dominance de Pareto) d'un espace. Ce front, communément appelé « front de Pareto », devrait être dénommé « front de Pareto de rang 1 » pour être précis. En effet, en retirant ce front à l'ensemble des solutions existantes dans l'espace, un nouveau front de Pareto peut être déterminé, qualifié de « front de Pareto de rang 2 », et le procédé peut être répété jusqu'à classer l'ensemble des solutions par rang de front de Pareto croissant. Les solutions d'un même front de Pareto n'étant pas comparables, des critères de classement supplémentaires peuvent être envisagés, comme par exemple la distance de *crowding* (§ 3.2.4.2) ou le respect d'une ou plusieurs contraintes du problème d'optimisation.

La **sélection par tournoi** ou par tournoi de foules consiste, quant à elle, à sélectionner le meilleur individu parmi T individus choisis au hasard dans la population. Le principe est illustré Figure 3-10. Notons que plus T est grand, plus la pression de sélection est forte.

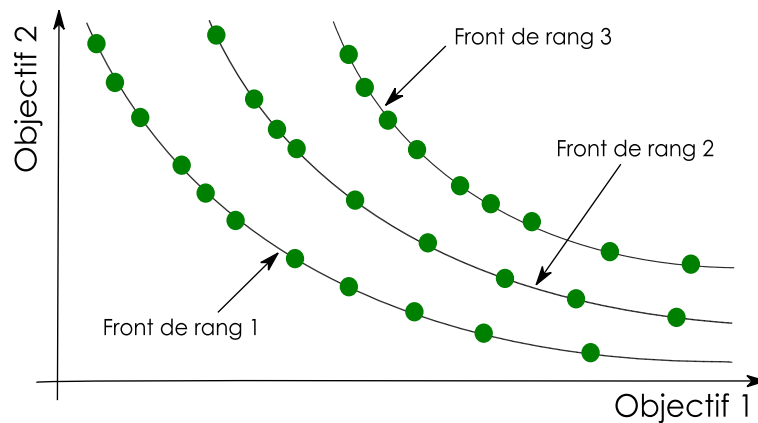


Figure 3-9. Illustration de la notion de rang associée au front de Pareto, cas d'un problème de minimisation à deux critères

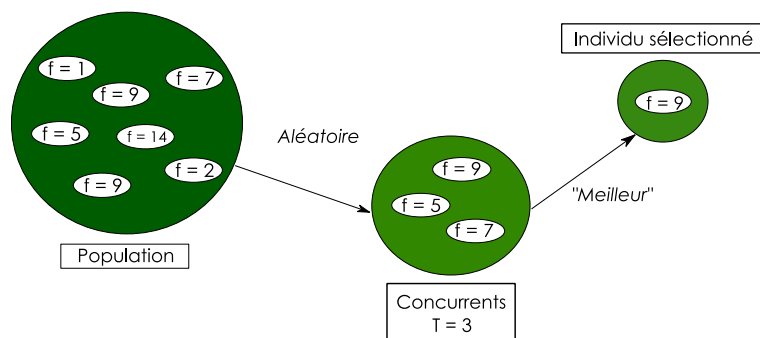


Figure 3-10. Illustration de la sélection d'un individu dans une stratégie de sélection par tournoi à 3 individus dans le cas d'une fonction à maximiser

Comme nous venons de le voir, différentes stratégies de sélection sont possibles, et ne s'excluent pas toujours mutuellement. Dans une sélection par tournoi, le meilleur individu peut par exemple être sélectionné selon une sélection par rang de dominance.

3.2.4. Choix d'un algorithme de type NSGA-II

L'état de l'art synthétique réalisé dans les sections 3.2.1, 3.2.2, et 3.2.3 a présenté les mécanismes de base du fonctionnement des algorithmes évolutionnaires. Il permet à présent dans cette section d'argumenter le choix du type d'algorithme retenu, et de fournir ses principales caractéristiques.

3.2.4.1. OBJECTIFS D'UN ALGORITHME D'OPTIMISATION MULTICRITÈRE

En optimisation multicritère, l'exploration de l'espace de recherche doit viser un double objectif (Figure 3-11), à savoir mener conjointement :

- une intensification de la recherche ;
- et une diversification de la recherche.

L'**intensification** (également appelée l'exploitation ou « *convergence velocity* ») de la recherche consiste à faire progresser le front de Pareto courant vers une partie du front optimal du problème. Il s'agit de rechercher des nouvelles solutions au voisinage des solutions courantes.

La **diversification** de la recherche (« *convergence reliability* ») vise, quant à elle, à rechercher des nouvelles solutions au-delà du voisinage des solutions courantes, et dans des régions peu explorées. Le but poursuivi est de décrire le plus largement possible l'ensemble des compromis existants dans le front optimal.

Si le choix d'une métaheuristique⁵⁸ vis-à-vis d'un problème donné reste encore aujourd'hui un sujet ouvert (Dréo et al. 2003), il doit néanmoins être motivé par l'identification d'un algorithme mobilisant des mécanismes répondant à cette double exigence. Dans ce contexte, la section suivante propose de fournir quelques éléments permettant d'appuyer le choix d'un algorithme de type NSGA-II, sans pour autant que cela soit une justification *stricto sensu*.

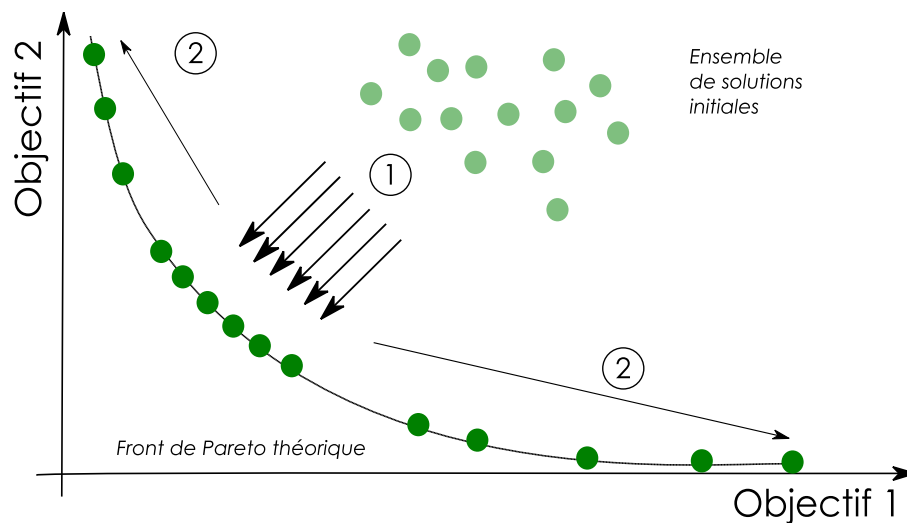


Figure 3-11. Illustration des deux objectifs en optimisation multicritère : l'intensification (1) et la diversification (2) de l'exploration (cas d'un problème de minimisation à deux critères), d'après Rivallain (2013)

3.2.4.2. CHOIX DE L'ALGORITHME NSGA-II

Notre choix s'est porté sur un algorithme de type NSGA-II, développé par Deb et al. (2002a) spécifiquement pour l'optimisation multicritère. Il s'agit d'un

⁵⁸ Pour rappel, les métaheuristiques correspondent à un ensemble de techniques d'optimisation approchée permettant de résoudre plusieurs types de problèmes (§ 1.3.2.2)

algorithme génétique élitiste de tri non-dominé, basé sur la relation de dominance de Pareto. Il mobilise plus particulièrement deux mécanismes, l'élitisme et la distance de *crowding*, lui permettant de répondre de manière intéressante à la double problématique posée lors de l'exploration de l'espace de recherche en multicritère.

❖ Élitisme

L'élitisme consiste à toujours garder au moins une partie des meilleurs individus, même s'ils n'ont pas été générés lors de certaines itérations de la boucle générationnelle. Autrement dit, un individu peut perdurer au fil des générations tant qu'il n'est pas dominé par un autre, marquant une séparation nette avec les phénomènes biologiques. Cette stratégie assure que les meilleures performances identifiées ne seront pas perdues. En contrepartie, l'élitisme peut devenir un moteur de l'intensification de la recherche trop prépondérante, et conduire alors à une perte de la diversité génétique au sein de la population. Cela nécessite de disposer d'un mécanisme permettant de s'opposer à cette attraction de la recherche exercée par les meilleurs individus. Ainsi, comme le recense (Rivallain 2013), certains AE sont non-élitistes, tels que les algorithmes VOES (« *vector optimised evolution strategy* »), WBGA (« *weight-based genetic algorithm* »), NSGA (« *non dominated sorting genetic algorithm* »), ou encore NPGA (« *niched Pareto genetic algorithm* »), et au contraire, d'autres sont élitistes, tels que les algorithmes DPGA (« *distance-based Pareto genetic algorithm* »), SPEA (« *strength Pareto evolutionary algorithm* ») ou encore NSGA-II (« *fast and elitist non dominated sorting genetic algorithm* »). Zitzler et al. (2000) ont montré que l'élitisme permettait une convergence accrue des algorithmes d'optimisation multicritère évolutionnaires. Lutton (2004) signale deux stratégies classiques de remplacement élitistes. Pour constituer la population à la génération suivante, la stratégie (μ, λ) consiste à ne conserver que les $\mu - \lambda$ meilleurs individus de la population courante et à compléter par les λ enfants. La stratégie $(\mu + \lambda)$ vise, quant à elle, à retenir les μ meilleurs individus parmi les μ individus de la génération courante et les λ enfants.

❖ Distance de *crowding*

La distance de *crowding* correspond à l'une des principales améliorations, avec l'élitisme, de l'algorithme NSGA (Srinivas et Deb 1994) introduite par Deb et al. (2002a) dans l'algorithme NSGA-II. Cette distance mesure la dispersion des solutions non-dominées d'un front de Pareto. Mathématiquement, elle représente le demi-périmètre de l'hypercube défini par les plus proches voisins d'une solution, chaque dimension étant normalisée au préalable. Ainsi, plus cette distance est grande, plus l'individu est « isolé » des autres membres du front, et porte, potentiellement, une information génétique inédite dans cet ensemble d'individus non-dominés. Cette métrique permet donc de départager des

individus d'un même front de Pareto, en favorisant ceux situés dans des régions peu peuplées (« *not crowded* »). Une illustration en deux dimensions est proposée Figure 3-12. Par rapport à la fonction utilisée dans l'algorithme NSGA pour maintenir une bonne diversité dans la population, la distance de *crowding* intégrée dans l'algorithme NSGA-II présente deux avantages : elle ne nécessite pas de paramètre interne, délicat à régler et influençant significativement le fonctionnement de la méthode et est moins coûteuse en calculs.

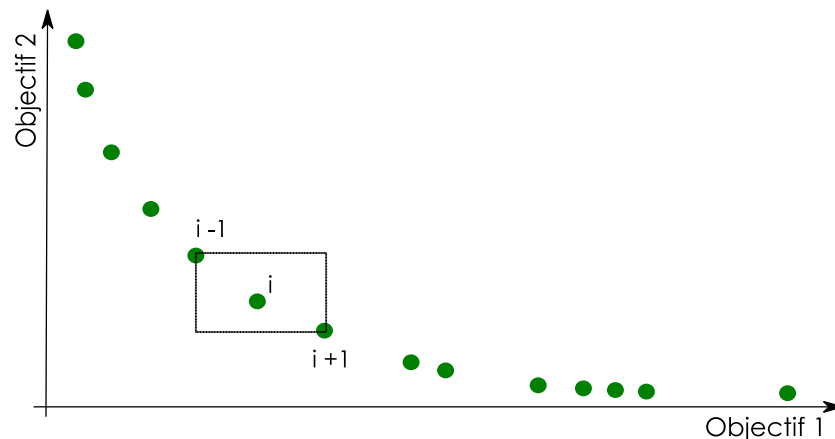


Figure 3-12. Illustration du périmètre de l'hypercube pour la solution i , cas d'un problème de minimisation à deux critères

❖ Performances de l'algorithme NSGA-II

Dans Deb et al. (2002a), la combinaison de ces deux mécanismes permet à l'algorithme NSGA-II de présenter, pour neuf problèmes tests, des meilleures performances que deux autres algorithmes élitistes : SPEA et PAES (« *Pareto-archived evolution strategy* ») en matière de vitesse de convergence et de diversité du front. De manière antérieure, six algorithmes évolutionnaires dont l'algorithme NSGA avaient été comparés sur six problèmes test (Zitzler et al. 2000). Une hiérarchie claire avait pu être observée en matière de convergence vers le front de Pareto optimal : l'algorithme SPEA est significativement plus performant que l'algorithme NSGA, lui-même nettement au-dessus des quatre autres algorithmes. En considérant que l'algorithme SPEA était le seul incorporant l'élitisme comme part centrale dans son fonctionnement, le résultat de ces deux études tend à fournir des éléments rassurants sur les performances de l'algorithme NSGA-II. Dans le domaine du bâtiment, ses performances ont également été comparées à celles de quatre autres AE sur un problème d'optimisation à deux critères (coût de construction et consommation énergétique) dont les variables étaient la taille, la forme, et la position de fenêtres sur la façade sud d'un bâtiment commercial à Chicago (Brownlee et al. 2011). Les résultats montrent que l'algorithme NSGA-II présente les meilleures performances en matière de convergence et de diversité du front, que ce soit avec ou sans contraintes sur les

dimensions des fenêtres. De manière plus subjective, le nombre de citations de l'article fondateur de Deb peut également être considéré comme le témoin de la grande popularité de cet algorithme.

3.2.4.3. CARACTÉRISTIQUES DE L'ALGORITHME NSGA-II MIS EN ŒUVRE

Dans ce paragraphe, nous détaillons les principales caractéristiques de l'algorithme qui a été mis en œuvre dans le chapitre 5, chapitre applicatif de ces travaux de thèse.

❖ Représentations des solutions

Comme nous le verrons dans le chapitre 5, la nature des paramètres de conception étudiés est variable. Elle peut être soit continue (p. ex. l'épaisseur d'un isolant), soit discrète (p. ex. le nombre de modules photovoltaïques) soit catégorielle (p. ex. le type de menuiseries). Même si le génome de ces paramètres aurait pu être codé avec des représentations binaire et continue, nous avons fait le choix d'une représentation exclusivement binaire. Pour étudier la faisabilité et la pertinence de la démarche globale proposée, le choix d'une seule représentation permettait effectivement de réduire le temps de développement informatique, tout en laissant la possibilité d'enrichir l'outil par une seconde représentation. De plus, il nous a semblé plus naturel de discrétiser les quelques variables continues (épaisseurs d'isolation et surfaces vitrées de fenêtres) plutôt que d'adapter des opérateurs de croisement et de mutation continus à des variables discrètes ou catégorielles, d'autant qu'en réalité, les produits de construction disponibles sur le marché introduisent une forme de discrétisation en pratique. Par exemple, seules quelques épaisseurs de rouleaux de laine de verre existent chez les fabricants (60 mm, 80, 100, 120, 140, etc.).

❖ Génération de la population initiale

L'étape d'initialisation, correspondant à la génération d'une population de μ individus, s'effectue à l'aide de tirages aléatoires dans une loi uniforme entre 0 et 1 permettant, dans chaque bit de chaque gène de chaque individu, de charger un 0 (si la valeur tirée est strictement inférieure à 0,5) ou un 1 (sinon).

❖ Sélection pour reproduction

La stratégie de sélection pour la reproduction mise en œuvre correspond à une sélection par tournoi de foules, s'effectuant avec des tournois à $T = 2$ individus. La procédure consiste à dupliquer la population courante des μ individus, puis à effectuer $\mu/2$ tournois dans la population courante et de même dans la population dupliquée. Cela permet finalement de disposer de μ parents sélectionnés. Un individu peut donc être au maximum deux fois parent à l'issue de cette sélection. Notons également que, dans cette procédure, la taille de la

population doit être un multiple de quatre. En effet, le croisement nécessite *a minima* deux parents, et chaque parent est issu d'un tournoi entre deux individus. Pour remporter un tournoi, les individus sont départagés selon trois critères de priorité décroissante :

- le respect de la contrainte de bilan énergétique positif (partie 1.4) ;
- le rang du front de Pareto d'appartenance ;
- la distance de *crowding*.

La démarche algorithmique est la suivante :

*si les deux individus violent la contrainte, **alors** :*

- *si l'un des deux la viole moins, **alors** il est sélectionné.*
- ***sinon** :*
 - o *si l'un des deux appartient à un front de Pareto de rang inférieur⁵⁹, **alors** il est sélectionné.*
 - o ***sinon** :*
 - *si l'un des deux présente une plus grande distance de crowding que l'autre, **alors** il est sélectionné.*
 - ***sinon**, un tirage aléatoire désigne l'individu retenu.*

***sinon** si l'un des deux individus la respecte, **alors** il est retenu ;*

***sinon** :*

- *si l'un des deux appartient à un front de Pareto de rang inférieur, **alors** il est sélectionné.*
 - ***sinon** :*
 - o *si l'un des deux présente une plus grande distance de crowding que l'autre, **alors** il est sélectionné.*
 - o ***sinon**, un tirage aléatoire désigne l'individu retenu.*
-

❖ Opérateur de croisement

L'opérateur de croisement mis en œuvre est un croisement à un point de coupure opérant sur deux parents afin de générer deux enfants. La procédure est la suivante :

tirage aléatoire dans une loi uniforme entre 0 et 1.

*si le nombre tiré est supérieur à la probabilité de croisement p_c , **alors** l'enfant 1 est la copie du parent 1 ; et l'enfant 2 celle du parent 2 (pas de croisement).*

***sinon**, pour chaque gène j , $j \in \llbracket 1; d \rrbracket$*

- *Tirage aléatoire d'un nombre entier m entre 1 et l_j-1 , avec l_j la longueur*
-

⁵⁹ Pour éviter toute confusion, nous précisons que le terme inférieur se rapporte au numéro du rang. Le rang le plus bas est donc le rang 1.

de la chaîne de binaires codant l'information du gène j ;

- *Croisement au point de coupure situé entre le bit m et $m + 1$.*
-

❖ Opérateur de mutation

L'opérateur de mutation mis en œuvre est une mutation déterministe appliquée à chaque individu de la population de la manière suivante :

pour chaque gène j , $j \in \llbracket 1; d \rrbracket$

- *si le nombre tiré est supérieur à la probabilité de mutation p_m , alors le gène est inchangé (pas de mutation).*
 - *sinon :*
 - o Tirage aléatoire d'un nombre entier m' entre 1 et l_j ;
 - o Mutation binaire sur le bit m' .
-

❖ Sélection pour le remplacement

La stratégie de sélection pour le remplacement mise en œuvre est une stratégie élitiste ($\mu + \lambda$), c'est-à-dire visant à sélectionner les μ meilleurs individus parmi une population intermédiaire constituée des μ individus de la population courante et des λ enfants. La taille de la population est en effet considérée constante au fil des générations. Dans ces travaux, $\lambda = \mu$. Pour remplir la population de la génération suivante, les individus sont classés et sélectionnés selon les mêmes priorités que celles utilisées lors de l'étape de sélection pour la reproduction, à savoir, dans l'ordre décroissant de priorité :

- le respect de la contrainte de bilan énergétique positif (partie 1.4) ;
- le rang du front de Pareto d'appartenance ;
- la distance de *crowding*.

À noter que les potentiels individus doublons sont conservés dans le processus d'optimisation, même si, informatiquement, l'évaluation de leurs performances est économisée pour des raisons évidentes de temps de calcul.

❖ Critère d'arrêt

Le nombre de générations a été choisi comme critère d'arrêt dans un premier temps. Simple à mettre en œuvre, ce critère permet également de maîtriser l'effort de calculs requis. En revanche, ce critère n'offre aucune garantie sur la convergence de l'algorithme à l'issue du processus : le nombre de générations autorisées pouvant être insuffisant pour converger ou au contraire excessif. Pour cette raison, des critères basés sur la convergence pourront être envisagés par la suite.

3.2.5. Applications à la conception de bâtiments

Les algorithmes évolutionnaires, et en particulier l'algorithme NSGA-II, ont fait l'objet de nombreuses applications dans le secteur du bâtiment (Nguyen et al. 2014), de la conception de sous-systèmes jusqu'à celle, globale, de l'ouvrage, en réhabilitation comme en construction neuve.

Wright et al. (2002) ont mis en œuvre un algorithme MOGA (« *multiple objective genetic algorithm* ») non élitiste pour optimiser la conception d'un système de CVC (chauffage, ventilation, et climatisation) au regard du coût d'exploitation de ce système, du confort thermique intérieur, et d'un objectif « d'infaisabilité » correspondant à la valeur agrégée des violations des contraintes considérées (Wright et Loosemore 2001).

Palonen et al. (2009) ont développé et testé différents algorithmes hybrides, basés notamment sur l'algorithme NSGA-II pour étudier l'optimisation conjointe du coût sur le cycle de vie et l'énergie consommée pour chauffer une maison individuelle via un système de chauffage électrique selon cinq variables portant sur le renforcement de la résistance thermique de l'enveloppe et l'efficacité de l'échangeur de la VMC double-flux.

Pernodet Chantrelle (2010) et Rivallain (2013) ont exploité l'algorithme génétique NSGA-II pour identifier des stratégies de réhabilitation efficaces pour, respectivement, des bâtiments tertiaires et de logement et sous une approche globale de la performance ciblant les consommations énergétiques, les coûts financiers, le bilan environnemental, et le confort thermique. Rivallain (2013) prend en compte le phasage des bouquets de travaux, en définissant un second chromosome représentant l'ordre des mesures de réhabilitation, en plus du premier chromosome portant les informations concernant la nature propre des travaux.

Evins et al. (2012) ont également mis en œuvre un algorithme NSGA-II pour mener un processus d'optimisation en trois étapes : tout d'abord un criblage par plan d'expériences sur plusieurs dizaines de variables, puis une optimisation grossière sur 26 variables influentes et enfin une optimisation sur 14 d'entre elles, considérées plus complexes à optimiser. Ce processus a été appliqué sur un appartement de 60 m² environ, dans le but de réduire les émissions de GES et les coûts d'exploitation, sous contrainte de confort thermique, et à travers le nouveau code réglementaire du Royaume-Uni concernant les nouvelles constructions résidentielles.

Murray et al. (2014) ont utilisé un algorithme génétique élitiste introduisant, à chaque itération, quelques nouveaux gènes générés de manière aléatoire. Cette opération appelée « *new blood* » s'ajoute à la mutation. Leur objectif a été d'optimiser cinq mesures de rénovation pour un des bâtiments de l'université de

Cork, à savoir l'isolation des murs et des combles, le type de chaudière, la réduction des déperditions par les menuiseries et par les infiltrations. L'optimisation a porté sur le temps de retour sur investissement, les émissions de carbone, et le coût de la consommation énergétique annuelle.

Enfin, même si la métaheuristique utilisée n'est pas un AE, citons les travaux de thèse d'Armand Decker (2015) dont l'objectif a été de développer une démarche d'optimisation multicritère par essais particuliers de systèmes constructifs bois adaptés au multiétage. L'une des originalités de ce travail réside dans la prise en compte d'aspects rarement étudiés conjointement en optimisation. En effet, des objectifs sur le confort vibratoire des planchers, les besoins de chauffage, le confort thermique, ou le potentiel de réchauffement climatique sont considérés, et des contraintes relatives à la sécurité structurelle et incendie de l'ouvrage ont été intégrées.

3.2.6. Conclusion

Cette première partie du chapitre a consisté à présenter succinctement les algorithmes évolutionnaires :

- tout d'abord le vocabulaire spécifique qui leur est associé, et les mécanismes de base régissant leur fonctionnement ;
- puis l'algorithme NSGA-II, l'un des plus couramment appliqués, que nous avons choisi d'utiliser dans ces travaux pour mener l'optimisation multicritère afin de fournir une aide à la décision pour l'écoconception de MEPOS ;
- et enfin, quelques-unes de leurs applications au domaine du bâtiment.

Il en ressort que l'évolution artificielle est un concept puissant, permettant de traiter des problèmes difficiles dans un champ très large d'applications. Néanmoins sa mise en œuvre requiert généralement un coût calculatoire important, ce qui nécessite de bien saisir les mécanismes évolutionnaires sous-jacents pour bien combiner et régler les différents éléments constituant ces algorithmes. La seconde partie de ce chapitre est consacrée à cette problématique.

3.3. PARAMÉTRAGE

Les algorithmes évolutionnaires forment une classe de métaheuristiques de recherche basée sur un processus algorithmique particulier, dont les principales composantes sont les opérateurs génétiques (croisement et mutation) et les opérateurs de sélection (pour la reproduction et le remplacement). Ces

mécanismes évolutionnaires constituent les moteurs de l'exploration menée par ces algorithmes, et conditionnent pour beaucoup l'efficacité de ces derniers. Évaluer et améliorer le fonctionnement de ces algorithmes passe ainsi par l'étude du choix de ces opérateurs ainsi que de la valeur des paramètres qui leur sont associés (p. ex. probabilité de mutation pour l'opérateur de mutation), étape usuellement appelée **paramétrage**.

Pour aborder ce sujet, cette partie se décompose en quatre sections. La première section (3.3.1) vise à fournir les définitions de base et à justifier l'importance de cette problématique. La seconde section (3.3.2) s'intéresse à la qualification et la mesure de la qualité d'un algorithme et de son réglage. La troisième section (3.3.3) présente les méthodes permettant de mener cette étape de paramétrage. Suite à cet état de l'art, la quatrième section (3.3.4) décrit la méthodologie retenue pour ces travaux.

3.3.1. *Problématique du paramétrage des algorithmes évolutionnaires*

3.3.1.1. DÉFINITIONS PRÉLIMINAIRES

❖ Paramètres qualitatifs et quantitatifs

À travers la description du fonctionnement général des AE, a pu être illustrée l'existence de paramètres associés à ces algorithmes. Par exemple, la population doit être caractérisée par une taille, le croisement par une manière de combiner le patrimoine génétique des parents pour générer des enfants, la sélection pour remplacement par une façon de choisir les individus pour la génération suivante, etc. Ces différents paramètres caractérisant les AE peuvent être différenciés selon plusieurs critères. La terminologie retenue ici est celle proposée par Eiben et Smit (2011), distinguant deux types :

- les paramètres qualitatifs ;
- et les paramètres quantitatifs.

Les **paramètres qualitatifs** correspondent aux paramètres symboliques de l'algorithme, et appartiennent à un domaine ne comportant pas de relation d'ordre. Ils regroupent par exemple le type de représentation (binaire ou réel) ou les différents types d'opérateurs génétiques existants. Une liste non-exhaustive de ces opérateurs est disponible dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Exemples de paramètres qualitatifs

Opérateurs de variation		Stratégies de sélection	
Croisement	Mutation	Reproduction	Remplacement
Binaire à « un point »	Déterministe	Proportionnelle	Générationnel
Uniforme	Uniforme	Par rang	Par élitisme ou non
Barycentrique	Gaussienne	Par tournoi de foules	Stationnaire
etc.	etc.	etc.	etc.

Les **paramètres quantitatifs** appartiennent, quant à eux, à un sous-ensemble de $\mathbb{R}$. Ils dépendent fortement des paramètres qualitatifs et permettent de les instancier par l'attribution d'une valeur numérique. Citons par exemple les probabilités de croisement et de mutation pour les opérateurs génétiques, le nombre T d'individus concurrents (dans la sélection par tournoi), ou encore la taille de la population. Notons que les paramètres qualitatifs peuvent induire, ou non, des paramètres quantitatifs. Par exemple, une stratégie de sélection proportionnelle pour la reproduction n'induit pas, du moins dans sa version standard, de paramètre quantitatif contrairement à la sélection par tournoi de foules. Le choix du critère d'arrêt de l'algorithme peut également induire un paramètre quantitatif supplémentaire. En effet, l'utilisateur peut décider d'arrêter l'algorithme lorsque celui-ci atteint un nombre limite de générations. Dans ce cas, le nombre de générations devient un paramètre quantitatif, pouvant être optimisé.

❖ Algorithme évolutionnaire et variante d'un algorithme évolutionnaire

Cette distinction entre paramètres quantitatifs et qualitatifs est essentielle car elle permet de différencier un **algorithme évolutionnaire** des **variantes d'un algorithme évolutionnaire**. En effet, un AE est identifié par ses paramètres qualitatifs tandis qu'une variante de cet algorithme correspond, à paramètres qualitatifs fixés, à une instanciation propre des paramètres quantitatifs. Par exemple :

- Un AE utilisant un opérateur de sélection par rang est à distinguer d'un autre AE utilisant un opérateur de sélection par tournoi de foule.
- Pour un même algorithme donné, deux variantes de celui-ci sont à considérer si dans un cas, la probabilité de mutation est fixée à 0,2, et dans l'autre cas, elle est fixée à 0,3.

Le paramétrage consiste alors à choisir les paramètres qualitatifs puis les valeurs des paramètres quantitatifs, et ce, dans le but d'optimiser le fonctionnement de l'AE étudié.

3.3.1.2. IMPORTANCE DU PARAMÉTRAGE

Comme pour toutes les métaheuristiques, le réglage de ces paramètres est délicat et repose généralement sur la littérature ou sur l'expérience acquise progressivement. Depuis plus de trois décennies, de nombreux articles sur le réglage des paramètres des AE, et les interactions entre ces paramètres (qualitatifs et quantitatifs), ont été publiés. Cela s'explique entre autres par la complexité de ces interactions, non linéaires et dépendant fortement de la nature des fonctions à optimiser.

Pour illustrer ces propos, l'exemple des travaux de Deb et Agrawal (1999) peut être cité. Ils ont en effet étudié pour différents problèmes d'optimisation, l'interaction entre la taille de population, le taux de croisement et le taux de mutation de variantes d'algorithmes génétiques. Les résultats ont montré que pour certaines fonctions, il était préférable d'utiliser à la fois un opérateur de mutation et un opérateur de croisement, et parfois seulement l'un des deux. De plus, les auteurs ont également montré que les valeurs des taux de croisement et de mutation pour lesquelles l'algorithme trouve les solutions les plus performantes dépendaient de la taille de la population.

Dans la suite de cette section, nous présentons plusieurs études de paramétrage disponibles dans la littérature.

❖ Paramétrage qualitatif

Prasad et Singru (2010) ont étudié l'intérêt de modifier l'opérateur de croisement SBX pouvant être utilisé dans l'algorithme NSGA-II. La loi de probabilité suivie par l'opérateur d'origine est modifiée pour suivre une loi log-normale, opérateur proposé par Raghuwanshi et al. (2004). La convergence et la diversité des solutions ont ensuite été évaluées sur vingt fonctions objectifs différentes avec l'indicateur de la distance générationnelle (annexe D-2). Les résultats indiquent que la mise en place du nouvel opérateur a amélioré la performance de l'algorithme NSGA-II, notamment en permettant d'identifier de meilleures solutions pour de nombreuses fonctions.

Li et al. (2008) ont proposé une amélioration de l'opérateur de sélection utilisé par l'algorithme NSGA-II. L'opérateur d'origine utilise la distance de *crowding* pour évaluer la qualité des individus tandis que l'alternative proposée se base sur la méthode de l'arbre couvrant de poids minimal (« *Minimum Spanning Tree* »). Cinq indicateurs ont été retenus pour étudier la performance de cette amélioration de l'algorithme NSGA-II sur des fonctions tests couramment utilisées. Les résultats montrent qu'une meilleure diversité semble pouvoir être proposée pour une convergence équivalente. En contrepartie, l'opérateur proposé requiert davantage de calculs que celui évaluant la distance de *crowding*.

Ces deux exemples ont illustré qu'une optimisation des paramètres qualitatifs permettait d'améliorer la qualité de fonctionnement de l'algorithme NSGA-II, aussi bien en matière de diversité que de convergence des solutions. Cependant, dans ces travaux, nous nous concentrerons sur l'étude des paramètres quantitatifs, comme cela sera explicité en section 3.3.4.

❖ Paramétrage quantitatif

En fixant les paramètres qualitatifs de l'algorithme NSGA-II retenu, les principaux paramètres quantitatifs sont : la taille de la population, la probabilité de croisement, la probabilité de mutation, le nombre de générations, et le nombre d'individus par tournoi (ce dernier n'a pas été étudié dans ces travaux). La sensibilité d'un AE à ses paramètres quantitatifs et la complexité du paramétrage associée ont été montrées dans de nombreuses études telles que celles de Grefenstette (1986); De Jong (2007); Eiben et al. (2007); et Nannen et al. (2008).

Par exemple, la mutation permet de maintenir une certaine diversité dans la population au fil de son adaptation, mais un taux de mutation trop élevé reviendrait à effectuer une exploration proche d'une recherche aléatoire. À l'inverse, un taux de mutation trop bas pourrait entraîner une *dérive génétique*, c'est-à-dire la convergence de la population vers un état où tous les individus sont identiques (Siarry 2014). Des valeurs trop faibles ou trop élevées pour le taux de croisement nuiraient également à l'exploration, et notamment l'intensification de la recherche. De même concernant la taille de la population : une trop petite taille de population ne permettrait pas de décrire entièrement la surface des compromis accessibles et d'éviter des minimums locaux, et de manière plus globale, de profiter pleinement de l'une des idées fortes des métaheuristiques distribuées à savoir exploiter la « force collective » d'une population. Si une taille minimale semble requise, elle ne doit pas non plus être trop importante. Du fait d'un budget de calculs limité en pratique, cela conduirait en effet à réduire trop fortement le nombre de générations (puisque le produit de ces deux paramètres correspond au nombre total d'évaluations, exprimant l'effort calculatoire de recherche). Or ce sont les itérations du processus d'optimisation qui permettent l'amélioration de la population, donc cela nuirait à la qualité des individus trouvés.

Le choix en pratique des paramètres quantitatifs par les utilisateurs se fait généralement en considérant de manière empirique les différentes interactions existantes. Par exemple, en optimisation discrète, une taille minimale de la population peut être calculée de manière à faire apparaître statistiquement tous les allèles considérés au moins une fois au sein de la population initiale. Cette taille permet d'explorer statistiquement tout l'espace de recherche uniquement grâce à l'opérateur de croisement, le taux de mutation pouvant alors être très

faible, voire nul (Reeves 1993). Des règles expertes peuvent également être suivies comme par exemple celle suggérant que plus la fonction à optimiser est régulière, plus la taille de la population peut être réduite (puisque le risque de rester bloqué dans des minima locaux est moindre). De même, si la taille de la population est choisie petite, un fort taux de mutation pourra être utilisé dans le but de favoriser l'émergence de nouveaux individus, et compenser la relative faible diversité génétique initiale.

Néanmoins, le choix et le réglage d'une métaheuristique sont intrinsèquement liés à la nature du problème, et notamment aux fonctions objectifs considérées, rendant cette question du paramétrage difficile, et sans réponse généralisable. Par exemple, Sadeghi et al. (2014) et Mousavi et al. (2016) ont cherché les valeurs optimales de trois paramètres quantitatifs (taille de population, taux de mutation, et taux de croisement) de l'algorithme NSGA-II utilisé pour optimiser, dans les deux cas, un système de stockage de produits, où la fonction objectif différait. Les résultats, présentés Tableau 3-2, illustrent bien ce propos.

Tableau 3-2 : Valeurs optimales obtenues pour les trois paramètres quantitatifs étudiés à l'issue des paramétrages réalisés par Sadeghi et al. (2014) et Mousavi et al. (2016)

Paramètre	Valeurs optimales	
	(Sadeghi et al. 2014)	(Mousavi et al. 2016)
Taille de la population	65	50
Probabilité de croisement	0,6	0,8
Probabilité de mutation	0,2	0,1

Ce problème, inhérent à toutes les métaheuristiques, a même été théorisé par Wolpert et Macready (1997) sous le nom des théorèmes « *No Free Lunch* » montrant que si un algorithme A1 présente sur une classe de problèmes une performance plus élevée qu'un algorithme A2, alors il existe d'autres classes de problèmes pour lesquelles A2 aura une performance plus élevée que celle de A1.

❖ Paramétrage adaptatif et auto-adaptatif

Malgré l'importance du paramétrage des paramètres quantitatifs, cette étape n'est que peu abordée par les utilisateurs des AE, notamment en raison des temps de calcul associés souvent importants. Rappelons en effet que dans de nombreux cas, mener une optimisation sur le problème physique est déjà coûteux, et il n'est pas envisageable de réaliser plusieurs fois cette optimisation pour tester plusieurs réglages de l'AE utilisé. En pratique, le choix réalisé par de nombreux utilisateurs d'AE est donc un réglage empirique des paramètres quantitatifs, en accord avec les valeurs de la littérature.

Pour s'affranchir de cette contrainte, des alternatives consistant à ne plus utiliser des paramètres quantitatifs à valeurs fixées *a priori* mais à les rendre adaptatifs ou auto-adaptatifs au cours du processus d'optimisation ont été développées (Eiben et al. 2007; Lobo et Lima 2007). Par exemple, le taux de mutation peut être élevé lors des premières générations pour explorer largement l'espace de recherche puis être diminué au fil des générations afin d'accélérer la convergence finale. Des études ont également adapté la taille de la population pour la faire décroître au cours des générations, dans le cadre de la programmation génétique (Luke et al. 2003).

Les **paramètres dits adaptatifs** partent d'une valeur initiale qui évoluera toujours de la même manière quel que soit le problème considéré, alors que les **paramètres auto-adaptatifs** disposent de la faculté d'adapter automatiquement leur comportement (et donc leurs valeurs) au fil des générations en prenant en compte l'évolution de l'exploration, et les fonctions considérées (Regnier 2003). Un opérateur de mutation auto-adaptatif a par exemple été développé par Carvalho et Araujo (2009) pour améliorer, dans l'algorithme NSGA-II, l'opérateur de mutation statique proposé par Deb et Goyal (1996). Concernant le critère d'arrêt, Goel et Stander (2010) ont proposé deux indicateurs liés à la convergence pour s'affranchir du choix du nombre de générations. Ces indicateurs, nommés taux d'amélioration et taux de consolidation, se basent sur le maintien d'une archive externe des solutions non-dominées au fil des générations, afin d'effectuer des comparaisons entre l'archive et les solutions de la population courante. Ils permettent de suivre la convergence de l'algorithme, et ainsi, de détecter un moment opportun pour stopper le processus. En revanche, ils ne traduisent pas la qualité des solutions obtenues par l'algorithme (ex. un algorithme ayant convergé vers un minimum local, et y restant bloqué). Ces deux indicateurs seront décrits dans le paragraphe 3.3.4.2.

Si ces approches sont séduisantes, elles apportent néanmoins un niveau de complexité supplémentaire, un temps d'implémentation informatique non négligeable et parfois, de nouveaux paramètres à régler. Aussi, nous nous focaliserons sur les paramètres statiques. Il nous semble effectivement essentiel d'appréhender le fonctionnement classique de l'algorithme que nous avons retenu avant d'envisager une démarche de paramétrage plus raffinée. En outre, les informations obtenues à la suite de cette première étape pourraient amener à la conclusion que les performances obtenues sont déjà satisfaisantes, et que, pour l'utilisation qui en est faite, il n'y a pas d'intérêt significatif à encore améliorer cet aspect de la démarche globale proposée.

3.3.2. Indicateurs de qualité

Choisir et régler les paramètres d'un algorithme évolutionnaire dans le but d'obtenir le meilleur fonctionnement possible de celui-ci nécessite de considérer des indicateurs de qualité pour permettre de comparer les différents algorithmes et variantes d'algorithmes testés. Selon le cadre de travail proposé par Eiben et Smit (2011), deux composantes principales contribuent à la qualité d'un algorithme et de ses variantes :

- sa performance ;
- et sa robustesse.

En substance, la **performance** d'un algorithme d'optimisation peut ici être vue comme l'efficacité avec laquelle l'exploration dans l'espace de recherche est menée, pour un problème donné. La **robustesse** d'un algorithme traduit la constance de cette performance pour différents changements. Dans cette section, nous proposons de préciser ces notions et de présenter quelques indicateurs de mesure associés.

3.3.2.1. INDICATEURS DE MESURE DE LA PERFORMANCE

La performance d'un algorithme traduit le degré d'atteinte des objectifs d'exploration au regard des moyens mis en œuvre pour répondre à ces objectifs. Plus concrètement, la performance d'un algorithme se mesure à travers deux critères :

- la qualité des solutions obtenues ;
- la vitesse d'exécution de l'algorithme.

La **qualité des solutions obtenues** dépend intrinsèquement du problème à résoudre, et notamment du nombre de fonctions objectifs. En effet, dans le cas d'un problème monocritère, la qualité des solutions obtenues s'exprime simplement en fonction du niveau de convergence vers la solution optimale du problème tandis que, dans un problème multicritère, la qualité des solutions obtenues doit traduire le double-objectif intensification/diversification précédemment introduit (Figure 3-11), à savoir disposer de :

- solutions les plus proches possibles du front de Pareto optimal (**convergence**) ;
- solutions décrivant le plus largement possible ce front (**diversité**).

Deux approches sont possibles : intégrer ce double-objectif dans un indicateur unique ou utiliser plusieurs indicateurs. La première option facilite la comparaison des variantes d'AE testées tandis que la seconde permet de disposer de plus d'informations. La littérature fait état d'un vaste panel d'indicateurs de la qualité d'un ensemble de solutions non-dominées. Nous en

présentons sept en Annexe D d'après l'étude comparative de Knowles et Corne (2002), et en les distinguant en deux groupes : ceux nécessitant la connaissance du front de Pareto optimal, et ceux ne la nécessitant pas. Dans le Tableau 3-3, nous proposons une synthèse des caractéristiques de ces indicateurs. Parmi ces indicateurs, l'hypervolume est celui recommandé par Knowles et Corne (2002). De plus, il est relativement simple à mettre en œuvre et présente l'avantage de fournir une information à la fois sur la convergence et la diversité des solutions obtenues.

Tableau 3-3 : Synthèse des sept indicateurs présentés dans l'Annexe D, permettant de mesurer la qualité des solutions obtenues par un algorithme et ses variantes

Indicateurs	Qualité(s) mesuré(es)	Pré-requis
Hypervolume	Convergence, diversité	Point de référence
Couverture	Convergence	-
Différence de couverture	Convergence, diversité	Point de référence
Espacement de Schott	Diversité	-
Distance générationnelle	Convergence	Front de Pareto optimal
Proportion d'erreur	Convergence	Front de Pareto optimal
Erreur maximale du front de Pareto	Convergence	Front de Pareto optimal

Le second critère de performance d'un algorithme concerne sa **vitesse d'exécution**. Ce critère vise à mesurer les efforts de calcul consentis pour atteindre une certaine convergence des solutions. Plusieurs indicateurs traduisant ces efforts existent dans la littérature, comme par exemple : le nombre d'appels au(x) modèle(s), le temps CPU ou le temps réel d'exécution. Eiben et Jelasity (2002) ont étudié les avantages et les inconvénients de ces indicateurs, sans que l'un d'eux ne se distingue des autres.

En résumé, la **performance** d'un algorithme s'évalue au regard de la **qualité des solutions** obtenues par celui-ci versus sa **vitesse d'exécution**. Dans un problème d'optimisation monocritère, la qualité des solutions se mesure à travers la **convergence** de ces dernières vers l'optimum global du problème alors que, dans un problème d'optimisation multicritère, il faut également prendre en

compte la **diversité** de ces solutions. Trois approches sont possibles pour comparer plusieurs algorithmes ou variantes d'algorithmes :

- à vitesse d'exécution fixée, et en comparant la qualité des solutions ;
- à qualité des solutions fixée, et en comparant la vitesse d'exécution ;
- à vitesse d'exécution et qualité des solutions fixées, et en comparant la notion booléenne de réussite : si l'algorithme atteint la qualité des solutions donnée sous l'effort de calcul imposé, alors sa réussite est validée ; à l'inverse, il est considéré que l'algorithme a échoué.

Dans l'analyse des résultats, il convient d'intégrer le caractère stochastique des AE pouvant induire une certaine variabilité dans les résultats obtenus et les performances constatées. Dans cette optique, les essais réalisés sont le plus souvent répétés un certain nombre de fois, et les performances analysées de manière statistique. Deb et al. (2002) ont par exemple réalisé quinze répétitions pour chaque variante de l'AE étudié. Lorsque le coût calculatoire est trop important, il est possible de fixer la graine de la suite de nombres aléatoires générés afin de comparer les variantes suivant un même référentiel bien que cela amène très probablement un biais dans l'analyse des résultats.

Les possibilités d'évaluer la performance d'un AE étant présentées, nous nous intéressons à présent à étudier sa robustesse.

3.3.2.2. INDICATEURS DE MESURE DE LA ROBUSTESSE

Dans la littérature, différentes définitions de la robustesse coexistent. Le dénominateur commun entre ces définitions est la notion de variabilité de la performance d'un algorithme selon différents facteurs. Si ces facteurs sont multiples, Eiben et Smit (2011) en identifient trois catégories, les conduisant à définir trois types de robustesse associée :

- la robustesse à la nature du problème à résoudre ;
- la robustesse au choix et réglage des paramètres de l'algorithme ;
- la robustesse à la graine de la suite de nombres aléatoires générés.

❖ **Robustesse aux changements de conditionnement du problème**

Une variante d'un AE est construite pour résoudre un problème d'optimisation spécifique. Cette variante optimisée pour ce problème donné est qualifiée de « spécialiste » et ses performances sur d'autres problèmes ne sont pas évaluées ou considérées. Le paramétrage étant un processus coûteux en temps de calcul, les utilisateurs réguliers d'AE souhaiteraient disposer de variantes d'algorithmes dites « généralistes », présentant de bonnes performances pour plusieurs types de problèmes ou pour plusieurs fonctions objectifs. Ce type de robustesse est illustré Figure 3-13, où la performance de la variante d'un algorithme est représentée selon une série de problèmes. Deux propriétés de ce type de robustesse peuvent

être identifiées. La première correspond à la différence de performance $B = \text{Max} - \text{Min}$ de la variante. Si l'amplitude de B est élevée, la variante est dite faillible (« *fallible* »), car selon le problème considéré, elle pourra présenter de très mauvaises performances. La seconde propriété concerne la gamme d'application A de la variante étudiée, selon un seuil T de performance minimale requis. Si A est grand, alors la variante est considérée utilisable sur une large gamme de problèmes (« *widely applicable* »). Cette notion de la robustesse est valable uniquement pour des variantes d'un AE, et non pour des AE eux-mêmes. Pour pouvoir mesurer cette robustesse, il faut en effet que tous les paramètres soient renseignés.

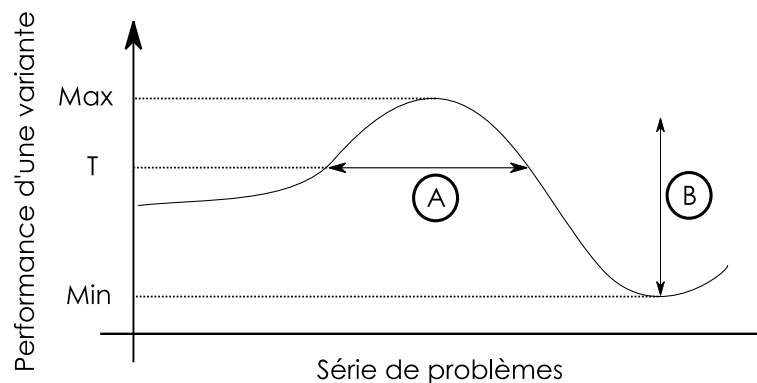


Figure 3-13. Illustration de la robustesse de la variante d'un algorithme aux changements de conditionnement du problème, d'après Eiben et Smit (2011)

❖ Robustesse aux changements des valeurs des paramètres quantitatifs

Le deuxième type de robustesse concerne les AE et non leurs variantes associées. Il s'agit d'étudier à travers différentes variantes, la sensibilité d'un algorithme au changement de ses paramètres quantitatifs. La Figure 3-14 schématise, pour un problème donné, la différence de performance d'un algorithme selon les valeurs prises par ses paramètres, *i.e.* selon une série de variantes de celui-ci. De ce graphique, deux propriétés relatives à ce type de robustesse peuvent être identifiées. La première concerne la différence de performance $D = \text{Max} - \text{Min}$ de l'algorithme. Si l'amplitude de D est élevée, alors l'algorithme peut être qualifié de paramétrable (« *tuneable* ») au sens où le choix de la valeur des paramètres influencera fortement ses performances. La seconde propriété correspond à la gamme C de valeurs de paramètres présentant une performance considérée comme acceptable vis-à-vis d'un seuil T . Plus l'éventail de ces variantes acceptées sera large, plus l'algorithme sera dit tolérant (« *tolerant* »).

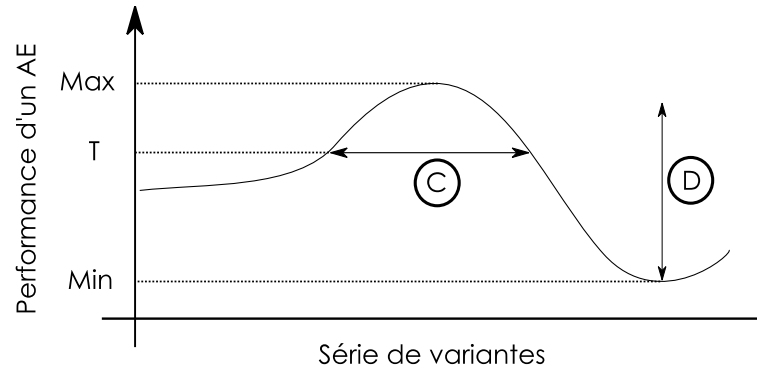


Figure 3-14. Illustration de la robustesse d'un algorithme aux changements de valeurs de ses paramètres quantitatifs, d'après Eiben et Smit (2011)

❖ Robustesse aux changements de graine aléatoire

Les AE étant des algorithmes stochastiques, ils sont soumis à différents tirages aléatoires lors de leur processus. L'évaluation de chaque variante passe ainsi par un nombre de répétitions indépendantes, à paramètres quantitatifs fixés mais avec des graines différentes, permettant de disposer de plusieurs mesures d'une même variante et d'apprécier statistiquement sa performance. C'est à travers ces mesures qu'il est possible d'évaluer ce troisième type de robustesse. Par analogie avec les deux premiers types, il est possible d'extraire deux propriétés relatives à cette robustesse, illustrées Figure 3-15. Si la différence de performance F entre la performance maximale et la performance minimale obtenues à la suite de plusieurs répétitions est élevée, alors la variante est dite instable (« *unstable* »). Sa performance est ainsi très volatile vis-à-vis d'un changement de graine. La deuxième propriété est relative au taux de succès, en lien avec la notion booléenne de réussite précédemment introduite. Si pour une graine donnée, la variante atteint un seuil T de performance minimal, alors l'essai est concluant (« *successful* ») et la valeur 1 est attribuée. Si la variante échoue pour cet essai, c'est la valeur 0 qui est attribuée. Le taux de succès représente la proportion d'essais concluants (E) sur l'ensemble des essais effectués.

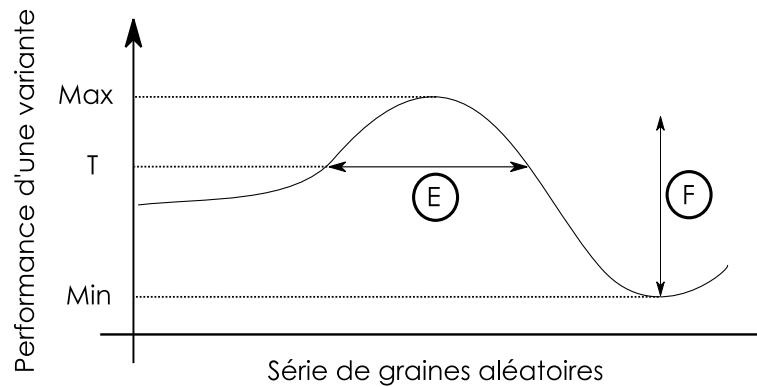


Figure 3-15. Illustration de la robustesse de la variante d'un algorithme aux changements de graine aléatoire, d'après Eiben et Smit (2011)

Dans cette section, nous avons introduit les composantes sur lesquelles repose la qualité d'un algorithme évolutionnaire. De plus, nous avons décrit plusieurs indicateurs et approches permettant d'évaluer cette qualité dans le but de comparer différents algorithmes ou réglages d'algorithmes. Les moyens d'évaluation de la qualité d'AE ou de variantes d'AE étant présentés, il convient à présent de s'intéresser aux méthodes de paramétrage disponibles, permettant l'étude d'un algorithme et du réglage de ses paramètres.

3.3.3. Méthodes de paramétrage existantes

Le paramétrage d'un algorithme d'optimisation représente un problème d'optimisation en soi, à l'intérieur du problème réel d'optimisation considéré, à savoir l'identification de concepts optimaux de maisons à énergie positive dans une démarche d'écoconception. Pour éviter d'introduire d'éventuelles confusions entre ces deux niveaux d'optimisation par les termes utilisés, nous proposons une terminologie spécifique, présentée Tableau 3-4. À l'échelle du problème d'optimisation « bâtiment », les variables à optimiser sont appelées des paramètres de conception, les critères d'optimisation, fonctions objectifs, et les méthodes d'optimisation, algorithmes d'optimisation. À l'échelle du problème d'optimisation « algorithme », les variables à optimiser correspondent aux paramètres quantitatifs, les critères d'optimisation, aux indicateurs de qualité, et les méthodes d'optimisation aux méthodes de paramétrage.

Tableau 3-4 : Schéma des deux niveaux d'optimisation et terminologie associée

Niveau du problème d'optimisation	Niveau « Bâtiment »	Niveau « Algorithme »
Variables à optimiser	Paramètres de conception	Paramètres quantitatifs
Critères d'optimisation	Fonctions objectifs	Indicateurs de qualité
Méthode d'optimisation	Algorithme d'optimisation	Méthode de paramétrage

Une revue et une classification complète des différentes méthodes de paramétrage a été réalisée par Eiben et Smit (2011). Cette section reprend en grande partie cet état de l'art où trois « taxonomies » T_1 , T_2 , et T_3 sont proposées pour classer et évaluer les méthodes de paramétrage. Au terme de « taxonomie », nous préférerons, dans la suite du document, le terme de « classification », plus approprié selon nous.

3.3.3.1. CLASSIFICATIONS DES MÉTHODES

❖ Classification T_1

Par essence, toutes les méthodes de paramétrage sont fondées sur le principe « générer-tester », c'est-à-dire générer des variantes puis tester leurs performances afin d'identifier les meilleures variantes. Cette caractéristique permet de diviser en deux catégories les méthodes de paramétrage (également appelées « *tuners* ») :

- les méthodes non-itératives ;
- les méthodes itératives.

Les **méthodes non-itératives** génèrent une et une seule fois l'ensemble des variantes qui seront testées durant la méthode. Cette génération est réalisée *a priori*, lors de l'initialisation, et les meilleures seront sélectionnées parmi ce lot généré et testé. À noter que la génération initiale de ces variantes peut être réalisée de manière aléatoire, en les sélectionnant de manière la plus uniforme possible dans l'espace des paramètres ou encore de manière arbitraire, par exemple en considérant des variantes utilisant des valeurs de paramètre déjà étudiées dans la littérature.

Les **méthodes itératives** ne génèrent quant à elles pas l'ensemble des variantes testées *a priori*, mais commencent avec un petit groupe à l'initialisation, et en créent de nouvelles au cours de l'exécution, de manière itérative et en fonction des tests antérieurs réalisés.

Étant donnée la nature stochastique des algorithmes évolutionnaires, la nécessité de réaliser plusieurs tests par variante étudiée donnent lieu à une sous-classification des méthodes de paramétrage :

- celles à une étape (« *single stage* ») ;
- et celles dites multi-étapes (« *multi stage* »).

Pour les procédures **à une étape**, le même nombre de tests est réalisé pour chaque variante étudiée, tandis que dans les procédures **multi-étapes**, plus sophistiquée, l'étape de test est entrecoupée d'une étape de sélection où seules les variantes les plus intéressantes sont conservées pour réaliser des tests supplémentaires à l'étape de test suivante. Avec une seule étape de test, les méthodes non-itératives sont donc forcément à une étape.

❖ Classification T_2

Le deuxième critère de classification se base sur l'effort de recherche fourni par la méthode de paramétrage, et intègre donc la notion d'efficience : la méthode doit chercher le meilleur paramétrage possible avec un minimum d'efforts fournis. La somme des efforts peut se traduire par l'expression (3.8) suivante :

$$A \times B \quad (3.8)$$

avec :

- A : le nombre de variantes étudiées par la méthode de paramétrage ;
- B : le nombre de tests réalisés par variante.

Le produit $A \times B$ représente donc le nombre total de tests menés par la méthode de paramétrage pour optimiser le réglage des paramètres quantitatifs de l'algorithme d'optimisation. Selon les méthodes, des mécanismes seront mis en place pour réduire intelligemment A , B ou les deux à la fois. Par exemple, les méthodes itératives permettent, de par leur fonctionnement, d'éviter de tester un nombre trop important de variantes à faible intérêt. En effet, à chaque itération, une génération sélective des prochaines variantes à tester est réalisée. Les méthodes itératives font donc partie des méthodes visant à mener une recherche efficiente sur A . Dans le Tableau 3-5, (Eiben et Smit 2011) listent un vaste panel de méthodes selon les classifications T_1 et T_2 . Elles sont présentées dans le paragraphe 3.3.3.2 suivant.

Nota : pour la classification T_2 , « A », « B », « $A \& B$ » dans le tableau réfère à la caractéristique de la méthode de pouvoir réduire intelligemment soit A , soit B , soit les deux à la fois.

Tableau 3-5 : Méthodes de paramétrage selon les classifications T_1 et T_2 , tiré de Eiben et Smit (2011)

Tuning methods distinguished by taxonomy T_1 & T_2 .

Tuning methods	Method	Taxonomy T_1	Taxonomy T_2
Sampling	Latin-Square	Single stage	A
	Taguchi Orthogonal Arrays	Single stage	A
Iterative sampling	CALIBRA	Multi stage	A
	Empirical Modelling of Genetic Algorithms	Two stage	A
Model-based	Sequential Experiment Designs	Single stage	A
	François-Lavergne	Single stage	A
	Logistic Regression	Single stage	A
	ANOVA	Single stage	A
	Design of Experiments with Regression Tree	Single stage	A
Iterative model-based	Coy's procedure	Multi stage	A
	Sequential Parameter Optimization (SPO)	Multi stage	A
	SPO + OCBA	Multi stage	A
Screening	Interactive Analysis	Single stage	B
	Ranking and Selection	Single stage	B
	Multiple Comparison Procedures	Single stage	B
	Sequential indifference-zone selection	Single stage	B
	Racing	Single stage	B
Iterative screening	F-RACE	Single stage	B
	Iterative F-RACE	Multi stage	A & B
Meta-evolutionary	Meta-Plan	Multi stage	A
	Meta-Algorithm	Multi stage	A
	Meta-GA	Multi stage	A
	Meta-GA + Racing	Multi stage	A & B
	FocusedILS	Multi stage	A & B
	Meta-ES	Multi stage	A
	Meta-CMA-ES	Multi stage	A
Enhanced meta-evolutionary	OPSO	Multi stage	A
	Local Unimodal Sampling	Multi stage	A
	REVAC	Multi stage	A
Multi-objective meta-evolutionary	REVAC ++	Multi stage	A & B
	M-FETA	Multi stage	A & B
	Performance Fronts	Multi stage	A

❖ Classification T_3

Dans la section 3.3.2 précédente, nous avons vu que la qualité d'un AE et des variantes d'un AE pouvait être appréciée selon quatre aspects :

- la performance ;
- la robustesse à un changement de conditionnement du problème ;
- la robustesse à un changement des valeurs des paramètres quantitatifs ;
- et la robustesse à un changement de graine aléatoire.

La taxonomie T_3 classe les méthodes de paramétrage en fonction des possibilités qu'elles offrent concernant l'étude de ces quatre critères. Eiben et Smit (2011) signalent que les méthodes de paramétrage permettent généralement de traiter deux tâches : la première a pour but d'optimiser la performance et la seconde d'apporter des informations sur l'un des types de

robustesse. Dans le Tableau 3-6, Eiben et Smit (2011) reprennent les méthodes listées précédemment, et les classent, selon la classification T_3 .

Tableau 3-6 : Méthodes de paramétrage selon la classification T_3 , tiré de Eiben et Smit (2011)

Tuning methods distinguished by taxonomy T_3 .

Described in section	Method	Performance		Seeds		Parameters		Problems	
		Quality	Speed	Success	Stability	Tolerance	Tuneability	Applicability	Fallibility
Sampling	Latin-Square	--	--	--	□	--	--	--	--
	Taguchi Orthogonal Arrays	--	--	--	□	--	--	--	--
Iterative sampling	CALIBRA		□		□	+	+	--	--
	Empirical Modelling of Genetic Algorithms		□		--	+	+	--	--
Model-based	Sequential Experiment Designs	--	--	--	--	□	□	□	□
	François-Lavergne	--	--	--	--	□	□	□	□
	Logistic Regression	--	--	--	--	□	□	□	□
	ANOVA	--	--	--	--	□	□	□	□
	Design of Experiments with Regression Tree	--	--	--	--	□	□	□	□
Iterative model-based	Coy's Procedure		+		--	□	□	□	□
	Sequential Parameter Optimization (SPO)		++		--	++	++	+	+
	SPO + OCBA		++		--	++	++	+	+
	Interactive Analysis	--			--	□	+	--	--
Screening	Ranking and Selection	--			--	□	+	--	--
	Multiple Comparison Procedures	--			--	□	+	--	--
	Sequential indifference-zone selection	--			--	□	+	--	--
	Racing	--			--	□	+	--	--
Iterative screening	F-RACE	--			--	□	+	--	--
	Iterative F-RACE		+		--	++	+	--	--
Meta-evolutionary	Meta-Plan		++		--	--	--	--	--
	Meta-Algorithm		++		--	--	--	--	--
	Meta-GA		++		--	--	--	--	--
	Meta-GA + Racing		++		--	--	--	--	--
	FocusedILS		++		--	--	--	--	--
	Meta-ES		++		--	--	--	--	--
	Meta-CMA-ES		++		--	--	--	--	--
Enhanced meta-evolutionary	OPSO		++		--	--	--	--	--
	Local Unimodal Sampling		+		--	--	--	□	□
	REVAC		+		--	++	+	--	--
Multi-objective meta-evolutionary	REVAC ++		++		--	++	+	□	□
	M-FETA	+	+	+	+	□	□	++	++
	Performance Fronts	+	+	+	+	--	--	+	+

Algorithms that span multiple columns can optimize/give information on one of the columns at the time.
 ++ excellent quality, + good quality, □ reasonable quality, -- poor quality, --- very poor quality.

3.3.3.2. DESCRIPTIF DES MÉTHODES

À partir de la classification T_3 , Eiben et Smit (2011) regroupent les méthodes de paramétrage en quatre catégories :

- les méthodes d'échantillonnage ;
- les méthodes basées sur un métamodèle ;
- les méthodes de criblage ;
- et les méta-algorithmes évolutionnaires.

Ce paragraphe vise à donner un aperçu minimal de ces quatre grandes familles mais suffisant pour permettre de justifier le choix réalisé (section 3.3.4).

❖ Méthodes d'échantillonnage

Les méthodes d'échantillonnage peuvent être décrites comme des méthodes permettant de réduire l'effort de recherche A , *i.e.* le nombre de variantes testées, par rapport à un plan factoriel complet. Les méthodes d'échantillonnage les plus courantes sont le carré latin (Myers et Hancock 2001)

et les plans d'expériences par la méthode Taguchi (Taguchi et Yokoyama 1993). Un (cas non itératif) ou plusieurs (cas itératif) échantillonnages de l'espace des paramètres quantitatifs étudiés sont réalisés, et la variante la plus performante ou la plus robuste est identifiée à la fin du processus, en analysant l'ensemble des tests réalisés. Le principal désavantage de ces méthodes est de fixer *a priori* les variantes à tester, limitant la qualité des résultats. De ce fait, ces méthodes sont parfois davantage considérées comme une étape préliminaire servant d'initialisation à une autre catégorie de méthodes que de réelles méthodes de paramétrage. Sans régler tous les verrous, les méthodes d'échantillonnage itératives permettent par un premier échantillon grossier suivi d'un ou plusieurs autres plus fins d'améliorer la qualité des résultats obtenus.

❖ Méthodes basées sur un métamodèle

Les méthodes basées sur un métamodèle visent, comme leur nom l'indique, à construire un métamodèle permettant d'estimer la ou les qualité(s) étudiée(s) de l'algorithme d'optimisation pour appliquer à ce métamodèle des méthodes d'optimisation sophistiquées, généralement impraticables avec des modèles classiques. Ce type de méthodes permet d'accélérer l'exécution des tests, et donc de diminuer l'effort de recherche B . Des méthodes non-itératives se basant sur une seule étape d'échantillonnage pour construire le modèle de régression sont possibles, et permettent également d'étudier la notion de robustesse. Néanmoins, les biais engendrés par la construction de ce métamodèle peuvent être importants, même s'ils sont réduits pour des méthodes itératives, et multi-étapes *a fortiori*. L'avantage de ce dernier type de méthode est d'actualiser le métamodèle tout au long du processus. Des informations, notamment sur la robustesse, sont disponibles pour cette famille de méthodes.

❖ Méthodes de criblage

Les méthodes de criblage représentent l'une des plus anciennes approches de paramétrage. L'objectif est similaire aux méthodes d'échantillonnage, à savoir identifier la meilleure variante parmi un nombre de variantes testées, mais le principe de fonctionnement diffère. En effet, ces méthodes mettent en œuvre des tests statistiques pour évaluer le potentiel de chaque variante sachant que les résultats présentent un caractère aléatoire dû à la stochasticité des mécanismes évolutionnaires. Ainsi, ces méthodes permettent de réduire l'effort de recherche B par rapport aux méthodes d'échantillonnage, répétant un certain nombre de fois la même variante pour intégrer cet aspect. De par l'idée relativement intéressante exploitée, ces méthodes sont considérées comme meilleures que celles basées sur des échantillonnages classiques.

❖ Méta-algorithmes évolutionnaires

Les méta-algorithmes évolutionnaires correspondent à des algorithmes évolutionnaires appliqués et adaptés au paramétrage. En effet, le paramétrage est un problème d'optimisation multicritère complexe, avec des critères d'optimisation (les indicateurs de qualité) non linéaires, des variables à optimiser (les paramètres quantitatifs) qui interagissent, des optimums locaux, etc. L'idée d'appliquer des AE à ce type de problème d'optimisation a été introduite par (Mercer et Sampson 1978), mais le coût en temps de calcul était tel que les recherches furent limitées. En plus, d'un coût calculatoire très élevé, la deuxième difficulté réside dans le bruit observé sur les indicateurs de qualité. Dans ce contexte, des AE spécifiques au paramétrage ont été développés, en empruntant une partie de la philosophie des méthodes de criblage. Par exemple, la méthode du *FocusedILS* (Hutter et al. 2009), se base sur l'algorithme évolutionnaire *ParamILS* (Hutter et al. 2007) en ajoutant une méthode de criblage pour sélectionner les individus dans l'algorithme. Malgré cela, la mise en œuvre d'un méta-AE pour un problème de paramétrage reste lourde et, ironiquement, repose la question du réglage de ce dernier.

3.3.4. Méthodologie retenue

Suite à l'état de l'art réalisé dans les sections 3.3.1, 3.3.2, et 3.3.3, nous décrivons ici la méthodologie retenue dans ces travaux. L'état d'esprit ayant conditionné les choix méthodologiques effectués a été de mettre en place une démarche volontairement simple et relativement peu coûteuse en matière de temps de calcul et d'implémentation informatique. En effet, dans le domaine du bâtiment, beaucoup d'inconnues entourent cette problématique n'ayant été abordée qu'à de rares occasions (Wright et Alajmi 2005; Hamdy et al. 2012; Xu et al. 2016). Ainsi, la démarche proposée dans ces travaux se veut être une première étape, mettant en œuvre des indicateurs et des méthodes simples, et qui pourra être raffinée dans le futur.

3.3.4.1. DÉMARCHE GÉNÉRALE

Nous avons avant tout souhaité évaluer l'importance qu'a le réglage des paramètres quantitatifs de l'algorithme retenu dans notre contexte afin de justifier l'éventuel intérêt de mettre en œuvre une méthode de paramétrage. Aussi, notre démarche se déroule en deux temps :

- une étape préliminaire ;
- puis, une opération de paramétrage à proprement parler.

L'ensemble de cette démarche a été appliquée à l'étude de cas présentée dans le chapitre 5, chapitre applicatif de cette thèse. Pour cette raison, seule la méthodologie sera décrite ici, les résultats étant incorporés dans le chapitre applicatif.

❖ Objectifs généraux de l'étude

Cette démarche a pour objet l'étude et l'optimisation de la qualité de l'algorithme NSGA-II retenu dans ces travaux. L'objectif est de s'intéresser aux trois aspects suivants de la qualité :

- performance ;
- robustesse aux changements de valeurs des paramètres quantitatifs ;
- robustesse aux changements de graine aléatoire.

La performance de l'algorithme sera étudiée pour être optimisée lors de l'opération de paramétrage, et les deux aspects de robustesse seront étudiés de manière plus qualitative, lors de l'étude préliminaire. Pour ce faire, différents choix méthodologiques ont été effectués.

3.3.4.2. CHOIX MÉTHODOLOGIQUES EFFECTUÉS

❖ Paramètres étudiés

La démarche proposée concerne les paramètres quantitatifs de l'algorithme NSGA-II retenu (3.2.4), et plus particulièrement :

- la **taille μ de la population** courante ;
- la **probabilité p_m de mutation** ;
- la **probabilité p_c de croisement**.

Afin de limiter le nombre de variantes à tester et d'éviter un travail d'implémentation informatique supplémentaire, le nombre T d'individus par tournoi dans la sélection pour la reproduction, n'a pas été considéré dans cette étude, de même que des paramètres qualitatifs de l'algorithme.

❖ Dénomination des variantes testées

Pour faciliter la lecture des résultats, une **convention de nommage** des variantes a été mise en place, et prend l'expression suivante :

$$PXYCZ \quad (3.9)$$

avec :

- X : la taille de la population (P) de la variante testée ;
- Y : le taux de mutation (M) de la variante testée ;
- Z : le taux de croisement (C) de la variante testée.

Par exemple, une variante présentant une taille de population de 200, un taux de mutation de 15 %, et un taux de croisement de 80 % sera nommée : *P200M15C80*.

❖ Approche de comparaison de la performance des variantes testées

Pour comparer la performance des différentes variantes de l'algorithme qui seront testées, nous avons choisi une approche **à vitesse d'exécution donnée**, et où la comparaison s'effectue sur la qualité des solutions obtenues. Cette approche permet de contrôler le temps de calcul nécessaire pour mettre en œuvre la démarche proposée.

À partir de la population initiale, l'effort de recherche alloué a été fixé à **6 000 appels** aux modèles *COMFIE* et *novaEQUER*. Le nombre de générations n'a de ce fait pas été étudié puisqu'il permet d'ajuster le nombre d'appels par variante en fonction de la taille de la population testée dans chaque variante.

❖ Indicateurs de performance de l'algorithme

Pour mesurer la qualité des solutions, l'indicateur **hypervolume** a été retenu. Parmi les sept indicateurs présentés dans l'Annexe D, l'hypervolume est celui recommandé par Knowles et Corne (2002). De plus, il est relativement simple à mettre en œuvre et à comprendre, et présente également l'avantage de fournir une information à la fois sur la convergence et la diversité des solutions obtenues. Enfin, cet indicateur est également reconnu (Knowles et Corne 2002) comme l'un des seuls à présenter un critère de monotonie selon la relation de dominance de Pareto (si tout élément d'un ensemble B est dominé par au moins un élément d'un ensemble A , alors l'hypervolume $s(A, R)$ sera supérieur à l'hypervolume $s(B, R)$, ce qui est une propriété intéressante dans la comparaison d'ensembles.

Comme nous le verrons dans le chapitre 5, le front de Pareto optimal du problème d'optimisation considéré dans l'étude de cas a pu être déterminé, et nous choisissons de l'exploiter pour calculer l'hypervolume car cela permet une réponse pratique satisfaisante à la double limite de cet indicateur (annexe D-1), *i.e.* sa sensibilité au choix arbitraire d'un point de référence et aux ordres de grandeur des fonctions objectifs. En effet, l'hypervolume sera calculé par rapport au point Nadir (§ 1.3.2.1) du problème, et une normalisation entre 0 et 1 sera réalisée à l'aide des points Nadir et Idéal pour éviter de favoriser une dimension du problème. La relation suivante explicite cette normalisation :

$$x'_{P,j} = \frac{x_{P,j} - x_{Nadir,j}}{|x_{Idéal,j} - x_{Nadir,j}|} \quad (3.10)$$

avec :

- $x'_{p,j}$: la j -ème coordonnée normalisée d'un point P quelconque de l'espace F des fonctions objectifs, avec j allant de 1 à la dimension de F ;
- $x_{P,j}$, $x_{Idéal,j}$, $x_{Nadir,j}$, respectivement la j -ème composante des points P Idéal, et Nadir, avec j allant de 1 à la dimension de F .

En complément, nous avons choisi de calculer trois autres indicateurs :

- le taux d'individus doublons dans le front de Pareto courant ;
- et les taux d'amélioration et de consolidation proposés par Goel et Stander (2010), et introduits au § 3.3.1.2.

Un individu doublon correspond à un individu présentant un génotype identique à un autre individu. Si le calcul du taux d'individus doublons dans le front de Pareto courant est évident de par la définition donnée, nous détaillons le calcul des deux autres indicateurs, considérés comme des indicateurs de convergence et se basant sur le maintien d'une archive externe des solutions non-dominées au fil des générations. Cette archive est actualisée après chaque génération avec la réalisation des opérations suivantes :

- suppression des solutions de l'archive dominées par les solutions du nouveau front de Pareto ;
- ajout des solutions du nouveau front de Pareto non-dominées par rapport aux individus de l'archive ;
- suppression des doublons de l'archive.

En comparant l'archive à une génération n donnée à l'archive à la génération $n - 1$ antérieure, le **taux d'amélioration** comptabilise alors le nombre d'individus de l'archive à la génération $n - 1$ qui sont dominés (et remplacés) par des individus non-dominés de l'archive à la génération n . À l'inverse, le **taux de consolidation** comptabilise le nombre d'individus de l'archive à la génération $n - 1$ encore présents dans l'archive à la génération n , c'est-à-dire encore étant encore non-dominés.

Pour présenter des indices normalisés entre 0 et 1, ces nombres comptabilisés sont divisés par la taille de l'archive à la génération courante (N_n). Les taux de d'amélioration (T_A) et de consolidation (T_C) sont reliés par la relation (3.11) suivante :

$$T_C = \frac{N_{n-1}}{N_n} - T_A \quad (3.11)$$

❖ Prise en compte de la stochasticité inhérente aux processus évolutionnaires

Comme vu précédemment, le caractère aléatoire des processus évolutionnaires induit une variabilité intrinsèque dans la mesure de la performance des variantes testées. La méthode basique pour intégrer cet aspect

est de tester plusieurs fois la même variante (le nombre de répétitions est généralement de l'ordre la dizaine, voire la centaine quand cela est possible). Dans notre cas d'application, chaque test correspond à la mise en œuvre d'une optimisation multicritère pour l'écoconception d'une maison à énergie positive, processus durant entre deux et trois heures selon la puissance de l'ordinateur. Tester ne serait-ce qu'une dizaine de variantes en les répétant une dizaine de fois aboutirait à près de deux semaines de calculs, ce qui a été jugé non prioritaire par rapport à d'autres aspects, et considéré comme perspective de ces travaux. De ce fait, cet aspect n'a pas été pris en compte systématiquement sur l'ensemble des variantes testées. Seules deux variantes ont fait l'objet de cinq répétitions permettant d'évaluer qualitativement l'importance de cet effet sur les résultats obtenus.

❖ Étape préliminaire

L'étape préliminaire a suivi un double-objectif :

- mettre ou non en évidence l'importance de paramétrer l'algorithme retenu ;
- mieux comprendre comment les mécanismes évolutionnaires opèrent dans notre cas d'étude.

Pour ce faire, nous avons choisi de comparer **cinq variantes assez singulières** :

- une variante de référence **P200M15C80**, correspondant à la variante utilisée avant cette étude, et dont les valeurs se basent pour partie sur la littérature ;
- deux variantes modifiant les taux de mutation et de croisement, à savoir :
 - o la variante **P200M0C100**, tendant à représenter une variante favorisant, avec un taux de croisement maximal et un taux de mutation nul, l'intensification par rapport à la diversification de la recherche (même si le croisement permet également d'apporter une certaine diversité génétique) ;
 - o la variante **P200M100C0**, tendant à représenter une variante menant, avec un taux de croisement nul et un taux de mutation maximal, une exploration proche d'une recherche aléatoire pure ;
- et deux variantes agissant sur la taille de la population, à savoir :
 - o la variante **P2000M15C80**, tendant à représenter une variante favorisant, avec une taille de population élevée, la diversité de la population au détriment sa convergence ;
 - o la variante **P20M15C80**, tendant à représenter une variante favorisant, avec une taille de population basse, la convergence de la population par rapport à la diversité.

Au regard des interactions existant entre ces paramètres, il faut bien entendu conserver une certaine prudence quant à l'interprétation proposée des variantes.

❖ Opération de paramétrage

Pour mener l'opération de paramétrage, une méthode par échantillonnage a été retenue, non-itérative (T_1), de caractéristique « A » (T_2), et de qualité raisonnable à très pauvre selon les aspects étudiés (T_3). La principale raison de ce choix est identique à celle ayant conduit à ne pas prendre en compte de manière systématique la stochasticité des processus évolutionnaires, à savoir le temps global d'exécution de ce genre de démarche. Ajoutons également le souci de mettre en œuvre une méthode simple à faible coût d'implémentation, même si la qualité des informations retenues est en contrepartie modérée. Pour réaliser l'échantillonnage, un plan d'expérience à trois niveaux a été choisi. Un éventuel second échantillonnage plus fin peut être effectué à partir des résultats du premier. Notre choix s'est porté sur les plans de Box et Behnken (Box et al. 2005), basés sur la combinaison optimisée de plans factoriels de dimension inférieure⁶⁰, et proposant un plan d'expérience à trois niveaux et trois facteurs, adapté à notre cas. En effet, les plans d'expérience de Taguchi, plus populaires, ne permettaient pas de construire un plan pour trois niveaux et trois paramètres. En représentant les niveaux par les valeurs -1, 0 et 1, le plan D de Box et Behnken choisi, prend la forme de l'expression (3.12) suivante, et comporte douze essais :

$$D = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Outre comparer les douze variantes pour identifier la meilleure, les plans de Box et Behnken permettent d'approcher la réponse du modèle étudié par un modèle polynomial d'ordre 2. Un métamodèle de ce type pourrait par exemple être construit pour estimer la performance de variantes de l'algorithme étudié en fonction des paramètres quantitatifs considérés.

⁶⁰ En présence de N facteurs, des plans factoriels complets pour 2 facteurs sont répétés N fois. Ainsi pour le plan de Box et Behnken, dans chaque sous-échantillon de 2^2 simulations (nombre de lignes du plan complet pour 2 facteurs), les valeurs de 2 des facteurs valent -1 ou +1 alors que les valeurs de tous les autres facteurs valent 0.

3.4. CONCLUSION DU CHAPITRE

Après une introduction (3.1), la première partie de ce chapitre (3.2) a présenté le principe de fonctionnement des algorithmes évolutionnaires ainsi que les mécanismes sous-jacents (3.2.1, 3.2.2, et 3.2.3). Un état de l'art synthétique a mis en évidence les différentes alternatives possibles pour façonner un algorithme évolutionnaire bien adapté au problème posé, notamment en matière de représentation du génome, d'opérateurs génétiques ou encore de stratégies de sélection. Cela a permis d'effectuer le choix d'un algorithme de type NSGA-II dont les principales composantes ont été détaillées (3.2.4), et son application dans le domaine du bâtiment mise en perspectives (3.2.5). La seconde partie de ce chapitre (3.3) a été consacrée à la problématique du choix et du réglage des paramètres spécifiques aux algorithmes évolutionnaires, conditionnant pour beaucoup leur efficacité (3.3.1). À cet effet, un état de l'art a été mené afin de répondre aux questions suivantes :

- Sur quels aspects la qualité d'un algorithme et de ses variantes doit être étudiée et comparée (3.3.2) ?
- À travers quels indicateurs est-il possible de mesurer et comparer ces différentes composantes de la qualité (3.3.2) ?
- Quelles sont les méthodes disponibles pour mener une optimisation de cette qualité et dans quel cadre sont-elles adaptées (3.3.3) ?

Les réponses extraites de la littérature ont permis de proposer une démarche simple bien que limitée (3.3.4), pour aborder cette problématique rarement prise en compte dans le domaine du bâtiment et de l'appliquer, dans le chapitre 5, sur une étude de cas.

Chapitre 4. Développements informatiques

La démarche d'aide à la décision proposée dans ces travaux nécessite l'application de méthodes mathématiques (optimisation multicritère, analyses de sensibilité et d'incertitudes) sur des modèles d'évaluation de la performance de concepts de maisons à énergie positive (COMFIE pour les aspects énergétiques, novaEQUER pour les aspects environnementaux, et un modèle économique lié au coût de construction), supposant leur opérabilité dans un environnement informatique cohérent. Dans le but de rendre possible la mise en œuvre de la démarche, un prototype de plateforme logicielle a été développé, utilisant l'outil statistique R comme « orchestrateur » des différents éléments la composant. Si ce développement découle d'un travail résolument collectif, cette thèse y a contribué de manière significative. Aussi, ce chapitre poursuit le double objectif de présenter l'architecture (partie 4.2) et le fonctionnement global (partie 4.3) de cette plateforme, mais aussi de dégager, de la meilleure façon possible, les principaux développements informatiques réalisés dans le cadre de ces travaux de thèse (partie 4.4).

SOMMAIRE DU CHAPITRE 4

4.1. Introduction.....	197
4.2. Présentation des composants-logiciels	197
4.2.1. Vocabulaire et éléments préliminaires.....	197
4.2.2. Historique et éléments de contexte.....	199
4.2.3. Composants logiciels de la plateforme	204
4.3. Articulation des composants-logiciels	209
4.3.1. Étape n°1 : saisie des données	210
4.3.2. Étape n°2 : tirage	216
4.3.3. Étape n°3 : calculs	217
4.3.4. Étape n°4 : retour des résultats	218
4.3.5. Étape n°5 : post-traitement	219
4.4. Principaux développements réalisés	222
4.4.1. Travaux informatiques concernant R	222
4.4.2. Travaux informatiques concernant COMFIE	232
4.4.3. Travaux informatiques concernant novaEQUER.....	234
4.4.4. Travaux informatiques concernant le modèle stochastique de comportement des occupants.....	238
4.4.5. Maintien, capitalisation, et diffusion de la plateforme.....	239
4.5. Conclusion du chapitre	243

4.1. INTRODUCTION

Cette plateforme logicielle est le fruit de l'addition progressive d'une multitude de contributions. Pour clarifier le propos de la thèse, la présentation des contributions est simplifiée.

L'objectif est de fournir au lecteur les informations principales lui permettant d'avoir une vision d'ensemble de la plateforme développée, sans rentrer dans des détails informatiques trop techniques, et présentant peu d'intérêt en matière de méthodologie globale. Dans cette optique, différentes annexes sont proposées pour apporter des éléments complémentaires à la présentation principale.

4.2. PRÉSENTATION DES COMPOSANTS-LOGICIELS

Après la définition du vocabulaire spécifique à ce chapitre (section 4.2.1), un historique du développement et des éléments de contexte seront donnés (section 4.2.2). Enfin, une présentation des différents éléments composant la plateforme logicielle sera fournie (section 4.2.3).

4.2.1. *Vocabulaire et éléments préliminaires*

❖ **Plateforme**

Pour faciliter la présentation, la dénomination exhaustive de « prototype de plateforme logicielle pour la conception optimisée » sera abrégée, dans le reste du chapitre, par « plateforme logicielle » ou « plateforme ».

❖ **Composants-logiciels**

Par « composants logiciels », nous entendons les briques élémentaires composant la plateforme informatique précitée.

❖ **Variations automatisées**

Toutes les méthodes mathématiques utilisées dans ces travaux (optimisation, analyses de sensibilité et d'incertitude) ont un besoin informatique commun dans leur mise en œuvre, à savoir la nécessité de pouvoir appliquer des modifications (ou des variations) de la valeur des paramètres étudiés, et ce, de manière automatisée entre chaque simulation. Ce besoin tient une place importante dans les développements informatiques menés.

❖ Environnement « *Pléiades* »

La plateforme de conception optimisée développée se fonde sur une partie de l'environnement « *Pléiades* » diffusé par la société IZUBA Énergies (Figure 4-1), à savoir :

- « *Alcyone* » : le modèleur graphique pour dessiner les projets.
- « *Pléiades* » : l'interface de saisie des caractéristiques thermiques du projet, et permettant de réaliser des simulations thermiques dynamiques en appelant *COMFIE*, le cœur de calcul, décrit dans la section 2.3.2. Le fichier contenant l'ensemble des informations du projet possède l'extension « *.plp* ».
- « *novaEQUER* » : l'interface de saisie des caractéristiques environnementales permettant de lancer des calculs ACV. Le fichier contenant l'ensemble des informations du projet possède l'extension « *.equ* ».

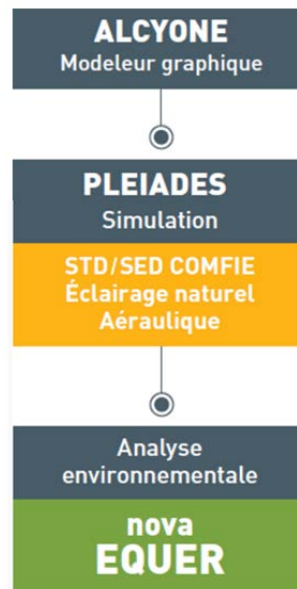


Figure 4-1. Partie de l'environnement « *Pléiades* » sur laquelle se fonde la plateforme développée, d'après <http://www.izuba.fr/logiciel>

❖ Branches « *UASA* » et « *neqBlackBoxETB* »

Par « branche », nous entendons ici une dérivation d'une version principale (« *trunk* ») d'un code informatique. Cette branche permet de mener le travail de développement informatique de manière isolée, sans affecter la branche principale. Une opération de fusion permet de rapatrier les développements effectués vers la version principale, une fois ceux-ci considérés comme aboutis. Il s'agit là d'une pratique courante dans le monde des développeurs

informatiques. Dans ce chapitre, nous nous intéressons largement à deux branches :

- la branche « UASA » associée au modèle *COMFIE* ;
- la branche « *neqBlackBoxETB* » associée au modèle *novaEQUER*.

Ces branches permettent la réalisation efficace de variations automatisées sur un ensemble de paramètres propres aux modèles auxquels elles sont associées. En effet, par l'intermédiaire d'exécutables court-circuitant les composants graphiques des versions commerciales de *COMFIE* et *novaEQUER*, des gains de temps substantiels sont obtenus entre chaque simulation, la transmission des nouvelles données de simulation s'effectuant par l'intermédiaire de fichiers textes. Ces exécutables sont surnommés « *BlackBox* », car ils sont utilisés comme des boîtes noires, en ne manipulant que des fichiers textes en entrée et en analysant ceux en sortie. Ces *BlackBox* constituent les briques canoniques de la plateforme développée.

4.2.2. Historique et éléments de contexte

Cette section vise à dresser l'historique et les éléments principaux de contexte concernant le développement de ces deux branches (et exécutables associés), permettant de mieux positionner le travail dont résulte la plateforme.

4.2.2.1. HISTORIQUE DE LA BRANCHE UASA

La branche UASA, pour « *Uncertainty Analysis and Sensitivity Analysis* », est née, comme son nom l'indique, d'une volonté initiale de mettre en œuvre des techniques d'analyses de sensibilité et d'analyses d'incertitudes (ASAI). Si son nom perdure encore aujourd'hui, il n'est plus vraiment adéquat puisque d'autres techniques (ex. optimisation) exploitent la possibilité de mener des variations paramétriques qu'elle propose. Quatre phases principales jalonnent son développement (Figure 4-2), dont nous synthétisons l'essence ci-après.

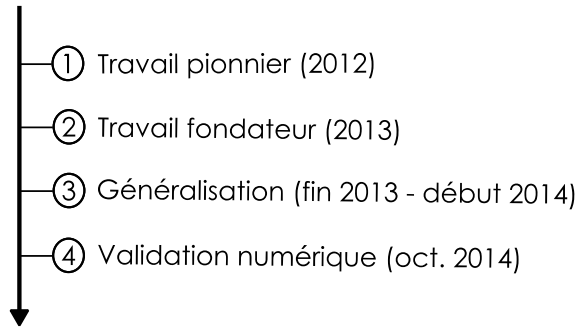


Figure 4-2. Les quatre phrases principales du développement de la branche UASA

❖ **2012, le travail pionnier de Wodli (2012) ;**

Principe : dans ce travail exploratoire, le logiciel OpenTurns⁶¹ avait été choisi pour réaliser des ASAI. Les plans d'expériences générés par le logiciel (sous forme de fichiers textes) étaient alors interprétés par un « *Wrapper* », pour modifier, à chaque expérience, le contenu de certains fichiers textes d'entrée de la *BlackBox COMFIE*. Suite aux simulations thermiques, le *Wrapper* récupérait, et transmettait sous un format compatible, les résultats de ces simulations à OpenTurns, pour leur analyse. Le *Wrapper* permettait ainsi la communication indirecte entre *COMFIE* (codé sous Pascal) et OpenTurns (codé sous Python).

Apport(s) : l'apport majeur de ce travail était d'avoir rendu possible les premières variations automatisées sur *COMFIE*, grâce à la création de procédures codées au sein du *Wrapper* permettant la modification des fichiers textes d'entrée de la *BlackBox COMFIE*.

Limite(s) : les principales limitations de ce développement étaient une lourdeur d'exécution (nécessité d'un troisième logiciel, intermédiaire, et de modifier parfois « brutalement » le contenu de certains fichiers textes en les supprimant complètement avant de les recréer) et la difficulté de modifier certains paramètres à partir des fichiers textes.

❖ **2013, le travail fondateur de Munaretto (2014) et Recht (2013), version « 1.0 »**

Principe : les variations automatisées ne s'effectuent plus par la modification, à chaque simulation, des fichiers textes utilisés par *COMFIE* pour les calculs, mais par le changement, en mémoire vive, de la valeur du paramètre visé. Le plan d'expériences est regroupé dans un seul fichier texte, lu par l'exécutable *BlackBox* à l'initialisation de la méthode, et stocké en mémoire vive. Avant chaque simulation, la valeur des variables informatiques représentant les paramètres devant être modifiés est remplacée par celle fournie dans le plan d'expériences conservé en mémoire vive. Ce principe est toujours à la base du

⁶¹ <http://openturns.org/>

fonctionnement de la version actuelle de la branche UASA, c'est pourquoi il a été qualifié de fondateur, et qu'il marque la version « 1.0 » de celle-ci.

Par ailleurs, un basculement du logiciel OpenTurns (à l'époque très développé sur les AI mais moins fourni sur les AS), vers l'outil statistique *R* (considéré plus complet pour les besoins identifiés), a été opéré. L'outil *R* est l'un des composants logiciels de la plateforme actuelle, et sera, à ce titre, présenté dans la section 4.2.3.

Apport(s) : l'amélioration principale apportée par ce travail était la modification de la valeur de variables stockées en mémoire vive, évitant de lentes opérations répétées sur des fichiers textes et levant par ailleurs la limitation rencontrée de modifier certains paramètres.

Limite(s) : les procédures codées au sein de la *BlackBox* étaient spécifiques à un projet, et non directement adaptables à un autre projet. En effet, l'identification dans le code des variables correspondant aux paramètres à étudier relevait d'une intervention manuelle, susceptible d'être renouvelée dès que le projet subissait une évolution majeure. De plus, l'ordre de l'exécution des procédures de modification devait correspondre à celui, arbitraire et variable selon le projet, dans lequel les paramètres à étudier étaient saisis par l'utilisateur de la méthode.

❖ **Fin 2013 – début 2014, généralisation par J. Barbaud et T. Recht, version « 2.0 »**

Principe : dans ce contexte, le développement de la plateforme s'est poursuivi par la création d'une convention de nommage des paramètres (§ 4.4.2.1 et Annexe E), permettant, via un préfixe, de transmettre leur type à la *BlackBox*. Ceci offrait la possibilité d'identifier automatiquement en mémoire vive les variables correspondant aux paramètres à étudier, mais aussi de s'affranchir du respect de l'ordre de saisie des paramètres dans l'exécution des procédures de modification.

Apport(s) : grâce à ce développement, la branche UASA devenait opérationnelle pour n'importe quel projet, sans contrainte ni intervention requise de la part de l'utilisation.

Limite(s) : il restait problématique de faire varier certains paramètres liés à la géométrie (§ 4.4.2.2), et cette version était encore instable et donnait parfois de faux résultats.

❖ **Oct. 2014, stabilisation suite à la campagne de validation de M. Robillart et T. Recht**

Principe : il a été mené une démarche de validation numérique de la *BlackBox* vis-à-vis des résultats, considérés de référence, de la version commerciale correspondante de *COMFIE*. Cette campagne a consisté à

comparer les besoins de chauffage obtenus par la *BlackBox* et ceux de la version commerciale pour le cas de la maison INCAS-BB. À chaque simulation, un seul paramètre a été modifié à la fois, et une plage de variation relativement grande a été considérée.

Apport(s) : suite à cette campagne, la branche UASA a pu être considérée dans une version validée et stable.

Limite(s) : certains paramètres liés à la géométrie restaient toujours problématiques à faire varier.

Depuis ces phases de développement majeures, un travail de mise à jour est régulièrement entrepris (§ 4.4.5.2), et des développements mineurs (au sens du fonctionnement global de la branche) sont menés pour enrichir, au fil des besoins, les fonctionnalités de la branche.

Signalons de plus, qu'au moment où ce manuscrit est rédigé, une cinquième phase a démarré, visant à lever partiellement la limite sur certains paramètres liés à la géométrie (§ 4.4.2.2).

4.2.2.2. HISTORIQUE DE LA BRANCHE « *NEQBLACKBOXETB* »

L'historique de développement de la branche *neqBlackBoxETB* est plus récent que celui de la branche UASA, mais suit les mêmes étapes principales.

❖ Le travail pionnier de Munaretto (2014), sous *EQUER*

Principe : la construction de cette branche a été initiée par le travail de Munaretto à la fin de sa thèse de doctorat, avec le logiciel *EQUER*. Le principe est équivalent à celui de la branche UASA, à savoir développer un exécutable permettant, a minima :

- de lire en entrée le plan d'expériences (sous forme d'un fichier texte) d'une méthode mathématique quelconque nécessitant des variations automatisées ;
- de stocker les valeurs de ce plan en mémoire vive ;
- d'effectuer, avant chaque simulation, la modification correspondante de la valeur des paramètres étudiés.

La notion supplémentaire à intégrer ici concerne le fait que l'utilisation d'*EQUER* présuppose, en amont, celle de *COMFIE*. Les calculs d'ACV requièrent en effet d'avoir simulé thermiquement le projet pour disposer des consommations énergétiques du projet. D'autres entrées d'*EQUER* sont également récupérées automatiquement du projet saisi pour la STD telles que, par exemple, les quantités de matériaux. L'un des principaux travaux a donc consisté à développer, dans la branche UASA, une procédure permettant, de manière automatisée, de générer

et regrouper dans un fichier texte d'entrée, l'ensemble des informations requis par *EQUER*.

Apport(s) : ce travail étend la possibilité de mener des variations automatisées à l'évaluation des impacts environnementaux associés aux bâtiments.

Limite(s) : à ce stade du développement, la branche ne fonctionnait que sur un projet (la maison INCAS). De plus, aucune variation sur des paramètres propres à l'ACV n'était encore explicitement possible.

❖ **Mi-2015, généralisation par Recht sous *novaEQUER***

Principe : pour les besoins spécifiques de cette thèse (évaluer les impacts environnementaux dans une démarche d'écoconception), un travail a été mené pour adapter à *novaEQUER* (l'évolution d'*EQUER*) et généraliser à tout projet de bâtiment, le travail précédent.

Apport(s) : ce travail a principalement contribué à développer des procédures génériques permettant de réaliser des variations automatisées intégrant les calculs ACV. Des développements secondaires ont par ailleurs été réalisés concernant la gestion d'isolants pouvant être fusionnés par *Pléiades* pour *COMFIE* (§ 4.4.3.2) et la valeur de consommation électrique exploitée par *novaEQUER* (§ 4.4.3.3) dans les calculs d'ACV. Enfin, un travail en partenariat avec Pannier a été mené, ayant permis :

- d'effectuer des variations automatisées sur quelques entrées propres à l'ACV (en lien avec les paramètres de conception explorés sur l'étude de cas présentée dans le chapitre 5) ;
- d'initier des démarches de validation numérique (section 4.4.3) ;
- de communiquer et de diffuser des documents d'information relatifs à ce nouvel outil interne disponible (Annexe F).

Limite(s) : à ce stade d'avancement, il restait donc de nombreux paramètres propres à l'ACV sur lesquels des variations automatisées ne pouvaient pas encore avoir lieu. De plus, les évolutions, à ce moment-là, fréquentes et significatives de *novaEQUER*, code principal dont cette branche descend, nécessitaient la poursuite du travail de validation.

❖ **2nd semestre 2015 : enrichissement et validation de la branche par M.-L. Pannier**

Principe : dans ce contexte, et pour répondre à des besoins plus avancés, le développement de la branche a connu une troisième et dernière phase majeure où :

- l'ensemble des paramètres propres à l'ACV a été rendu disponible pour des variations automatisées ;
- et une campagne de validation numérique approfondie a été menée.

Apport(s) : possibilité étendue de variations automatisées et version stabilisée

Limite(s) : à l'heure où a été écrit ce manuscrit, l'état de développement satisfait les besoins à l'échelle bâtiment. Le principal axe de travail est l'extension à l'échelle du quartier.

Tout comme la branche UASA, la branche « *neqBlackBox* » continue d'évoluer actuellement, à travers des développements mineurs par rapport à ceux venant d'être présentés.

4.2.3. Composants logiciels de la plateforme

Cette partie a pour but de présenter séparément les différents éléments constituant la plateforme logicielle développée (Figure 4-3). Ces éléments peuvent être regroupés en trois catégories :

- ceux relatifs à *COMFIE* ;
- ceux relatifs à *novaEQUER* ;
- ceux relatifs à l'outil statistique *R*.

Notre présentation est axée selon ces trois catégories.

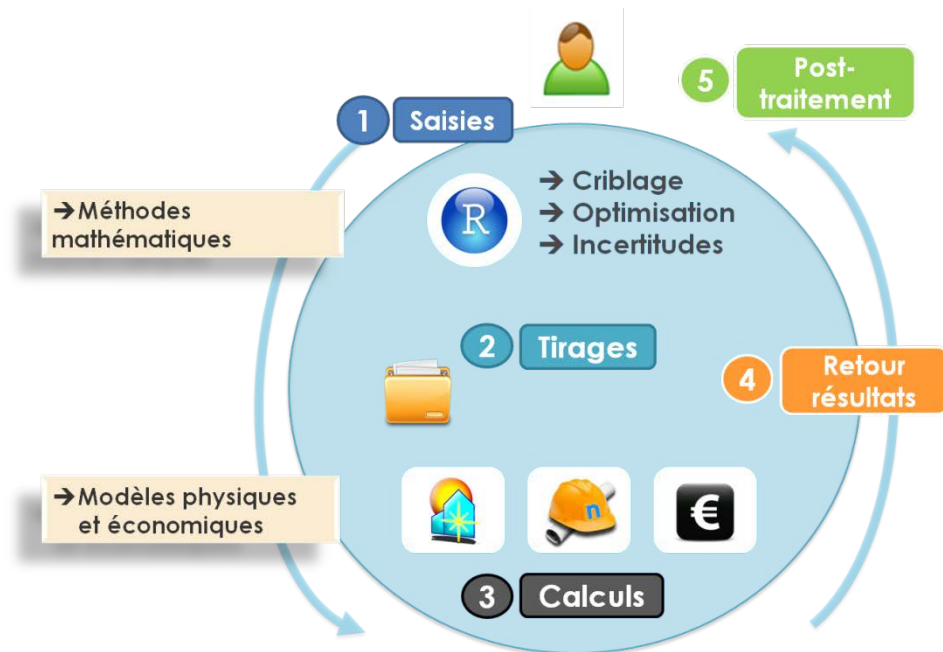


Figure 4-3. Illustration de la plateforme développée pour la conception optimisée

Pour être complet, d'autres éléments sont chaînés à cette plateforme, mais n'ont pas été présentés, car hors champ de la thèse. Citons :

- un script *R* sur l'analyse de sensibilité locale ;
- un script *R* sur le calibrage de modèles ;

- un script *R* sur les matrices d'Hadamard ;
- un script *R* sur la variabilité des données météorologiques ;
- un module *COMFIE* pour la prise en compte des pertes de distribution des réseaux d'ECS.

Dans le chapitre 5, le modèle stochastique de comportement des occupants développé par Vorger (2014) a été utilisé. S'il est également chaîné à la plateforme, nous l'avons, dans ces travaux de thèse, utilisé de manière séparée. Au regard des temps de calcul, il n'est pour l'instant pas encore envisageable de répéter les simulations évaluées en optimisation plusieurs dizaines (voire quelques centaines) de fois afin d'obtenir une distribution statistique en fonction des multiples scénarios d'occupation pouvant être générés par le modèle. Dans l'approche retenue, ces scénarios ont en effet été exploités pour créer un set de scénarios d'usage moyens (section 5.4.1).

4.2.3.1. ÉLÉMENTS RELATIFS À *COMFIE*

Les principaux éléments relatifs à *COMFIE* concernent globalement les entrées et les sorties de l'exécutable «*BlackBox*» de la branche UASA, schématisés dans la Figure 4-4.

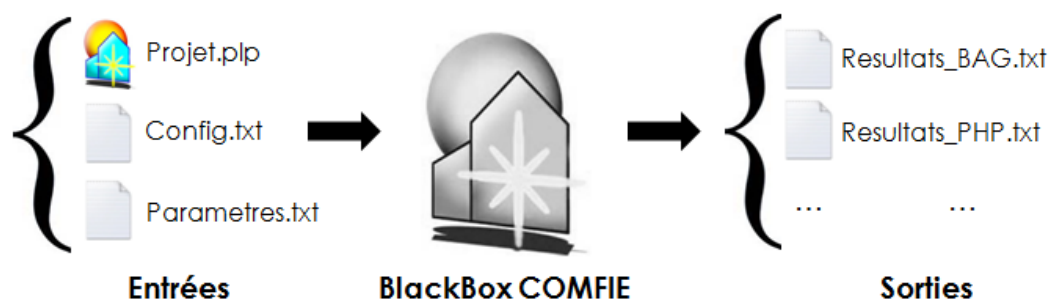


Figure 4-4. Entrées et sorties de la BlackBox COMFIE

Pour réaliser des variations automatisées, deux arguments sont à fournir en entrée de l'exécutable :

- le chemin complet du fichier *Pléiades* associé au projet étudié («*.plp*») ;
- l'adresse du dossier de travail, où :
 - o sont contenus les fichiers :
 - «*Config.txt*» : fournissant les informations générales concernant les variations à mener ;
 - «*Parametres.txt*» : fournissant le plan d'expériences ;
 - o seront chargés un fichier de bonne fin des simulations et d'attente, ainsi que les fichiers de résultats sous le format

« Resultats_XXX_i.txt », avec XXX un acronyme du type de la sortie et *i* le numéro de la simulation (ou de l'expérience).

Au préalable d'un appel à la *BlackBox*, le projet de bâtiment doit ainsi avoir été modélisé sous l'interface *Pléiades*, pour disposer d'un fichier « .plp ».

Les informations principales dans la structure du fichier Config.txt sont, par ligne, les suivantes :

1. nom de la variante d'étude, nombre de simulations total de l'étude ;
2. pas de temps de la simulation, liste de toutes les sorties désirées ;
3. période de simulation souhaitée (saisie en numéros de semaines de début et de fin de simulation) ;
4. liste des noms des zones (pour la génération de résultats par zones) ;
5. ligne spécifique au module « Occupants » (à ignorer autrement) ;
6. booléen si calculs ACV à faire, et si oui, adresse de la variante *novaEQUER* de référence pour le projet.

Le fichier « Parametres.txt » est une matrice de *N* lignes et *d* colonnes, avec une ligne supplémentaire de titres pour les colonnes où sont spécifiés les noms des paramètres étudiés, codifiés par une convention de nommage (§ 4.4.2.1 et Annexe E).

Les fichiers de sorties sont divers (de l'ordre d'une dizaine sans compter celles propres à certains modules comme celui concernant les occupants par exemple) et peuvent être, pour certains, générés pour différentes échelles temporelles (annuelles, mensuelles, horaires...). Citons à titre d'illustration :

- TIZ : le taux annuel d'inconfort thermique par zone ;
- BMG : le besoin de chauffage mensuel global ;
- PHP : la production horaire photovoltaïque.

À partir de ces trois fichiers d'entrée (le fichier « .plp » du projet, le fichier « Config.txt », et le fichier « Parametre.txt »), les variations automatisées peuvent être menées par la *BlackBox COMFIE*.

4.2.3.2. ÉLÉMENTS RELATIFS À *NOVAEQUER*

Tout comme les éléments relatifs à *COMFIE*, les principaux éléments relatifs à *novaEQUER* concernent globalement les entrées et les sorties de l'exécutable « *BlackBox* » de la branche *neqBlackBoxETB*, schématisés dans la Figure 4-5.



Figure 4-5. Entrées et sorties de la BlackBox novaEQUER

Pour réaliser des variations automatisées, un unique argument est à fournir à l'exécutable :

- le chemin absolu d'un fichier global d'extension « *.neqboxscript* ».

Une description détaillée de ce fichier, et plus globalement du fonctionnement de la *BlackBox novaEQUER* (aussi appelée *neqBlackBox*) se trouve dans la notice d'utilisation en Annexe F. Nous nous contentons donc ici de présenter l'essentiel, à savoir :

- une ligne pour spécifier le chemin complet de la variante *novaEQUER* (« *.equ* ») associée au projet *Pléiades* (« *.plp* ») ;
- deux lignes pour définir des options de configuration ;
- une ligne pour le nom des paramètres ;
- le reste du fichier, sous forme d'une matrice, contenant le plan d'expériences.

Indiquons ici qu'à l'instar de la *BlackBox COMFIE*, une convention de nommage a été développée pour la *BlackBox novaEQUER* dont l'Annexe F fournit une version suite à au travail de généralisation des procédures.

En matière de résultats, deux fichiers de sortie (d'extension « *.tab* ») existent, et contiennent :

- la valeur des douze indicateurs environnementaux calculés par *novaEQUER* (Tableau 1-3 ou Annexe F sur tout le cycle de vie ;
- la valeur des douze indicateurs environnementaux calculés par *novaEQUER*, décomposés pour chaque étape du cycle de vie.

4.2.3.3. ÉLÉMENTS RELATIFS À R

Le logiciel *R* est à la fois un langage informatique et un environnement de développement. De par ses différents avantages, *R* est un système d'analyse statistique et graphique reconnu et utilisé en recherche, en enseignement et en entreprise. C'est avant tout un logiciel gratuit et à code ouvert (« *open source* ») qui, de plus, est multi-plateforme puisqu'il se déploie sur les systèmes d'exploitation Windows, UNIX ou encore Macintosh. Langage interprété puissant avec une bibliothèque de fonctions riche, *R* est rapide à prendre en main d'autant qu'il

dispose d'un système de documentation intégré bien conçu. Le logiciel est doté de procédures efficaces de stockage et de traitement des données ce qui en fait un outil de choix particulièrement bien adapté aux problématiques de ce projet. Enfin, au travers d'une vaste communauté de bénévoles, R est un langage en constante évolution notamment via l'enrichissement de modules externes appelés « *packages* » permettant d'accéder à des méthodes statistiques plus avancées.

Les principaux éléments relatifs à l'outil statistique *R* concernent les différentes méthodes mathématiques (ici ASAI et optimisation) pouvant être utilisées, et un script général permettant de gérer les simulations. L'ensemble de ces codes informatiques consistent en des scripts d'extension *.R*. Ceux concernant les méthodes mathématiques ont été construits en mettant le plus souvent à profit des fonctions de « *packages* » spécialisés, téléchargeables sur le site du CRAN⁶² (un import depuis l'interface est possible). Par exemple :

- les packages « *sensitivity* » (Pujol et al. 2016) et « *lhs* » (Carnell 2016) contiennent les fonctions « *morris* », « *randomLHS* », « *sobol2007* », utiles pour la réalisation des scripts dédiés aux ASAI ;
- et le package « *mco* » (Mersmann et al. 2014), contient les fonctions « *nsga2* » et « *paretoFront* », utiles pour la réalisation des scripts dédiés à l'optimisation multicritère avec l'algorithme NSGA-II.

Ces fonctions ont, soit été utilisées directement (comme dans le cas des scripts pour les méthodes d'ASAI), soit retravaillées pour répondre à des besoins propres (comme dans le cas des scripts pour l'optimisation). Des informations plus détaillées sur la construction de ces scripts seront données dans la section 4.4.1. Pour disposer d'une vue globale, il faut simplement savoir que, pour chaque méthode mathématique disponible (criblage de Morris, échantillonnage LHS, analyse de sensibilité par le calcul des indices de Sobol, optimisation par algorithme NSGA-II, etc.), deux scripts R (au minimum) y sont associés :

- un script dit « Interface » permettant, via un affichage structuré et commenté du code, de centraliser les informations devant être renseignées par l'utilisateur de la méthode correspondante ;
- un script dit « Core » permettant, à partir des informations fournies par l'utilisateur, d'exécuter la méthode sélectionnée, et de retourner les résultats post-traités à ce dernier.

Pour certaines méthodes, des scripts complémentaires ont été développés, permettant, dans l'exemple de la méthode de Morris, de générer de manière personnalisée plusieurs graphiques associés à cette méthode.

Le script global de gestion des simulations permet, plus précisément, de :

⁶² <https://cran.r-project.org/>

- générer une arborescence structurée de dossiers, permettant l'allocation de dossiers de travail pour les *BlackBox*, l'archivage et le post-traitement des résultats ;
- paralléliser les simulations sur les différents cœurs du processeur de l'ordinateur utilisé ;
- superviser l'avancement des simulations, et gérer un certain nombre d'erreurs pouvant se produire lors des simulations ;
- réaliser un premier post-traitement des résultats.

Des informations plus détaillées seront fournies dans le § 4.4.1.3.

4.3. ARTICULATION DES COMPOSANTS-LOGICIELS

La partie précédente a permis de fournir les éléments essentiels de contexte ainsi que les principales caractéristiques des composants-logiciels constituant la plateforme développée. Dans cette partie, nous proposons d'illustrer l'articulation de ces composants en « simulant » le déroulement complet d'une optimisation lancée à partir de la plateforme par un utilisateur. Pour ce faire, nous nous appuierons sur les principales étapes décrites dans la Figure 4-6 qui constituera le fil conducteur de cette présentation.

Nous signalons par ailleurs ici que ces étapes sont communes à l'ensemble des méthodes mathématiques pouvant être appliquées, via la plateforme, et que, sauf mention contraire, le déroulement présenté ici à travers un exemple, peut être généralisé. Enfin, le lecteur pourra trouver des compléments détaillés d'information ayant été rédigés dans le livrable L5.3 du projet ANR FIABILITÉ⁶³, et plus précisément, dans :

- la partie 2.2 décrivant la plateforme sur les aspects ASAI, dans son état d'avancement mi-2014 ;
- et l'annexe A fournissant une notice d'installation et d'utilisation, dans son état d'avancement mi-2014.

Si en l'espace d'environ deux ans la plateforme a évolué, elle s'est surtout enrichie et améliorée, ce qui fait que l'extrême majorité des informations de ce livrable sont toujours valables au moment où ce manuscrit est rédigé.

⁶³ http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-10-HABI-0004

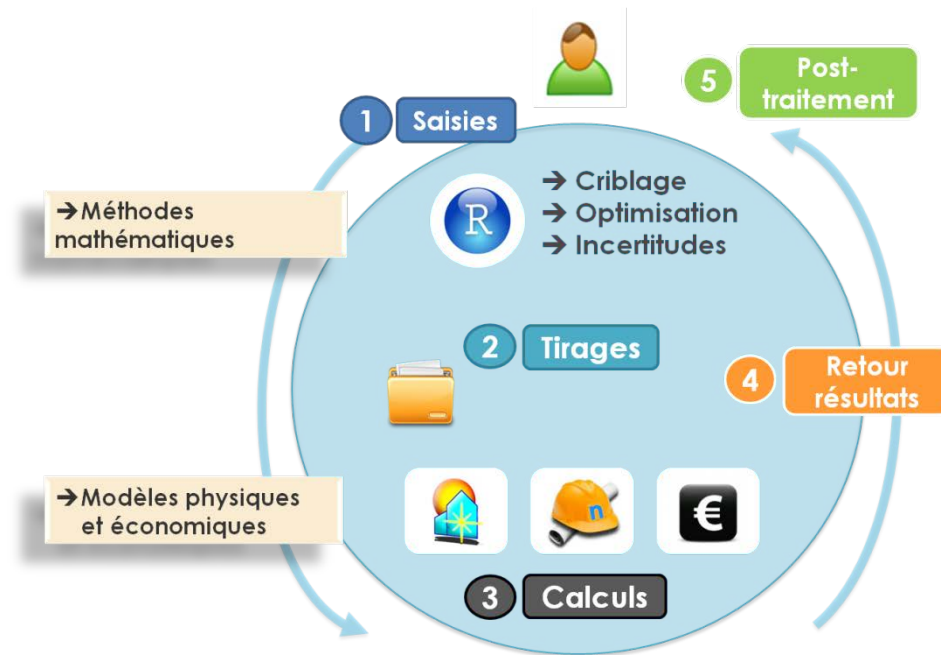


Figure 4-6. Principales étapes de déroulement lors de l'utilisation de la plateforme

4.3.1. Étape n°1 : saisie des données

La première étape consiste à saisir l'ensemble des informations nécessaires au lancement de la méthode. Comme précédemment indiqué, la saisie de ces informations est rassemblée dans un script « Interface » (Figure 4-7) permettant de simplifier et faciliter cette opération à l'utilisateur.

```
# version 2.1.0 : 25/02/16
# Contributeur(s): Charles Garnier, Thomas Recht
#-----
#
#              OPTIMISATION PAR ALGORITHME GENETIQUE
#              (basée sur la librairie mco)
#-----
#
#              SAISIE UTILISATEUR
#-----
```

Figure 4-7. Illustration du début du script « NSGA2_Interface »

Ces informations sont généralement structurées en trois niveaux :

- le niveau « Informations générales » ;
- le niveau « Informations propres à l'étude » ;
- le niveau « Informations propres à la méthode ».

Les **informations générales** comportent :

- l'acronyme de l'ordinateur (servant aux noms des fichiers d'entrée et de sortie) ;
- et l'adresse du dossier de travail principal (pour créer l'arborescence des sous-dossiers de travail).

La Figure 4-8 en propose une illustration dans le cas de l'exemple retenu.

```
#-----
# INFORMATIONS GENERALES
#-----

# Acronyme de l'ordinateur
#-----
pc <- "INZ" # Trois lettres

# Dossier de travail
#-----
Rwd <- "C:/Rwd/" # Ne pas saisir d'espaces, d'accents, ou autres symboles spéciaux
```

Figure 4-8. Illustration des informations générales dans l'exemple retenu

Les **informations propres à l'étude** concernent, le plus souvent :

- le nom du fichier « .plp » relatif au projet *Pléiades* ;
- la finesse du pas de simulation ;
- la liste des grandeurs d'intérêt (i.e. les grandeurs physiques sur lesquelles les méthodes mathématiques vont porter) ;
- la liste des zones suivies (i.e. celles où seront récupérées la valeur des grandeurs d'intérêt sélectionnées) ;
- le chemin de la variante *novaEQUER* de référence (si des calculs ACV sont souhaités), ce qui suppose un calcul manuel au préalable (Annexe F).

La Figure 4-9 en propose une illustration dans le cas de l'exemple retenu.

```
#-----
# INFORMATIONS PROPRES A L'ETUDE
#-----

# Nom du projet plp
#-----
plpName <- "Fousse_010316_BSOFamille.PLP"

# Nom de la variante d'étude
#-----
varName <- "CO2VsCost_BeConstraint_BSOFamille"

# Pas de simulation
#-----
simulationTimeStep <- 2 # 2 correspond à 1/2h. Choix possibles : 2,4,6,10

# Liste des zones suivies
#-----
zonesList <- c("Sejour","Chambres") # saisir NULL sinon

# Chemin de la variante novaEQUER initiale si simulation(s) ACV requises
#-----
neqVariantPath<- "C:/Rwd_Thomas/Mes données Pleiades+Comfie/Resultats comfie/
                  Fousse/010316_BSOFamille_14PV/equer/010316_BSO2Famille_14PV"
```

Figure 4-9. Illustration des informations générales dans l'exemple retenu

Les **informations propres à la méthode** sont spécifiques à cette dernière. Dans l'exemple retenu d'une optimisation avec l'algorithme NSGA-II, les informations se subdivisent en deux :

- les informations propres à l'algorithme génétique ;
- les informations propres à l'optimisation.

Rappelons que le livrable L5.3 du projet ANR FIABILITÉ permet de compléter cette illustration sur les aspects d'ASAI.

Dans cet exemple, les **informations propres à l'algorithme génétique** renvoient à la valeur de ses quatre paramètres quantitatifs, à savoir la taille de la population, le nombre de générations (définissant le critère d'arrêt de la méthode ici), et les probabilités de croisement et de mutation). La Figure 4-10 en propose une illustration.

```
#-----
# INFORMATIONS PROPRES A L'ALGORITHME GENETIQUE
#-----

# Nombre d'individus
#-----
n_individual <- 400 # ATTENTION : doit obligatoirement être un multiple de 4 !

# Nombre de générations
#-----
n_generation <- 30

# Probabilité de croisement
#-----
crossing_probability <- 0.8 # (entre 0 et 1)

# Probabilité de mutation
#-----
mutation_probability <- 0.15 # (entre 0 et 1)
```

Figure 4-10. Illustration de la saisie des informations propres à l'algorithme génétique

Les **informations propres à l'optimisation** correspondent :

- aux informations relatives à l'espace des décisions (Figure 4-11) ;
- aux informations relatives à l'espace des objectifs (Figure 4-12) ;
- aux informations relatives à l'espace des contraintes (Figure 4-12) ;
- à des options de configuration (Figure 4-13), telles que :
 - o un dossier où un ensemble de résultats pourra être disponible au fil des générations (notamment des graphiques au format « .pdf » automatiquement générés et des fichiers textes résumant toutes les informations d'une population) ;
 - o la fréquence (en nombre de générations) de l'enregistrement de ces résultats dans le dossier précité.

Plusieurs remarques peuvent ici être faites. Premièrement, il peut être noté que l'ensemble des sous-parties du script sont commentées de manière à permettre une saisie aisée et sans ambiguïté à l'utilisateur. Deuxièmement, le haut niveau d'automatisation de la plateforme peut être, entre autres, observé pour la saisie de l'espace des décisions et des objectifs. En effet, via la convention de nommage (§ 4.4.2.1 et Annexe E) l'utilisateur transmet de manière quasiment « transparente » les paramètres qu'il veut explorer. Pour étudier l'épaisseur des hourdis en polystyrène (ligne 2 de la Figure 4-11), il suffit en effet d'ajouter le préfixe « EPA » (pour épaisseur) avec un tiret bas devant le nom du matériau *Pléiades* donné (ici « PolystyreneHourdis ») pour que dans toute la suite des procédures, ce paramètre soit géré de manière automatique par les *BlackBox*. Le principe est équivalent pour les objectifs : une liste de noms explicites est à disposition de l'utilisateur (p. ex. l'indicateur « EffetDeSerre » de *novaEQUER* ici), et une procédure interne, dans « *SimulationsManagement.R* » s'occupera de réaliser la « traduction » pour les *BlackBox*, sans qu'aucune intervention de l'utilisateur ne soit nécessaire.

```
#-----
# INFORMATIONS PROPRES A L'OPTIMISATION
#-----

# Espace d'exploration
#-----

# Pour chaque dimension (ou variable) d'exploration, renseigner :
# le NOM, en suivant la convention de nommage ;
# le NOMBRE DE BITS, pour sa représentation (attention maximum 31 !) ;
# la BORNE INFÉRIEURE d'exploration
# la BORNE SUPÉRIEURE d'exploration

explorationSpace <- c( "EPA_MatFictifMurs",3,15,36
                      , "EPA_PolystyreneHourdis",3,12,28
                      , "EPA_MatFictifToiture",3,15,36
#                      , "EPA_ChapeBeton",2,6,24
#                      , "TypeIsolant",1,1,2

#                      , "Swf_DV_Alu_4.16.4_F2",2,1.5,3
#                      , "Swf_DV_Alu_4.16.4_FF2",2,1.5,3
                      , "Swf_DV_Alu_4.16.4_F3",2,2,5
#                      , "Swf_DV_Alu_4.16.4_FF3",1,1.15,2.3
                      , "Swf_DV_Alu_4.16.4_FFF3",1,1.46,2.92
                      , "Swf_DV_Alu_4.16.4_F4",2,0,3
                      , "Swf_DV_Alu_4.16.4_FFF4",1,2.71,2.71*2
#                      , "Swf_DV_Alu_4.16.4_VELUX_MK04",1,0,0.89
#                      , "Swf_DV_Alu_4.16.4_VELUX_MK06",1,0,1.07
#                      , "Swf_DV_Alu_4.16.4_VELUX_MK08",1,0,1.25
```

Figure 4-11. Illustration de la saisie des informations propres à l'espace des décisions (cas des isolants et des surfaces de menuiseries)

```
# Espace des objectifs
#-----

# Liste des objectifs
objectiveFunctionsList <- list("EffetDeSerre"
                              , "CoutDeConstruction"
                              # , "BilanEnergetiqueAnnuel"
                              )

# Espace des contraintes
#-----

# Liste des contraintes
# constraintsList <- list()
constraintsList <- list("BilanEnergetiqueAnnuel") # saisir list() si aucune contrainte
# Fonction(s) contrainte (sous la forme d'une expression supérieure ou égale à zéro)
```

Figure 4-12. Illustration de la saisie des informations propres à l'espace des objectifs et des contraintes

```
# Nom du dossier de synthèse de l'optimisation
#-----
ResultsFoldName <- "Synthese_Optimisation"

# Indice de sauvegarde des générations
#-----
n_sauv <- 1
```

Figure 4-13. Illustration des options de configuration existantes pour l'optimisation

Enfin, sur le même principe, des sorties complémentaires peuvent être, soit calculées par les *BlackBox*, (et les fichiers textes de résultats de chaque simulation

seront dans les différents dossiers de travail), soit partiellement « post-traitées » (Figure 4-14). La fonction « *SimulationsManagement.R* » s'occupera d'aller récupérer l'ensemble de ces fichiers dans les différents dossiers pour les agréger dans un unique fichier texte de synthèse par type. Les deux options sont offertes à l'utilisateur, car selon les cas de figure, il n'est pas évident qu'une agrégation soit toujours souhaitée. En effet, il peut être envisagé de générer des sorties supplémentaires pour des analyses ultérieures, et leur post-traitement immédiat, ralentissant la durée d'exécution du processus, n'apparaît ainsi pas forcément utile.

```
# Listes des sorties à générer et à retourner (par SimulationsManagement)
#-----
quantitiesToComputeAndReturn <- list("BesoinAnnuelGlob"
                                     , "TauxInconfortZone"
                                     #, "ProductionAnnuellePhotovoltaïque"
                                     ) # Saisir NULL si aucune contrainte

# Listes des sorties uniquement à générer (par SimulationsManagement)
#-----
quantitiesJustToCompute <- list("BesoinHoraireGlobal"
                                , "ConsommationHoraireElectrique"
                                #, "ProductionHorairePhotovoltaïque"
                                ) # Saisir list() si aucune sortie uniquement à générer
```

Figure 4-14. Options de génération et d'un premier post-traitement de sorties supplémentaires aux objectifs.

Nous venons de voir, à travers un exemple, la saisie des informations nécessaires pour la mise en œuvre d'une des méthodes mathématiques disponibles dans la plateforme (ici l'optimisation multicritère). Après cette nécessaire intervention de l'utilisateur pour transmettre les informations adéquates à la plateforme, l'ensemble de ce script est exécuté, en appelant à la fin du script « *NSGA2_Interface* », le script « *NSGA2_Core* » associé (Figure 4-15). Si nous avons souhaité à titre pédagogique fournir quelques visualisations concrètes pour l'étape de saisie, nous reprendrons une présentation conceptuelle dans la suite de cette illustration du déroulement complet d'une étude. Le script « *NSGA2_Core* » comporte en effet 1 000 de lignes de code environ.

```
#-----
#
#
#
#
#-----
# Appel au coeur de calcul
#-----
source(paste(Rwd, "ScriptsR/FousseConstructions/NSGA2_Core_BSO.R", sep=""))
```

Figure 4-15. Appel au script « *NSGA2_Core* » à la fin de la saisie du script « *NSGA_Interface* ».

Avant de présenter les étapes suivantes, il convient de signaler ici l'une des particularités du processus d'optimisation employé, à savoir la boucle générationnelle (Figure 4-16), ayant conduit à une généralisation de la plateforme. La nécessité de réaliser des itérations, entre méthode mathématique et modèles d'évaluation via la fonction « *SimulationsManagement.R* » constitue effectivement une différence marquante avec l'approche employée pour mener des analyses de sensibilité ou des propagations d'incertitudes. Il faut donc bien voir la présentation des étapes 2, 3, et 4 suivantes comme une itération du processus d'optimisation, qui sera ici répété 30 (nombre de générations) plus 1 (initialisation) fois (Figure 4-10).

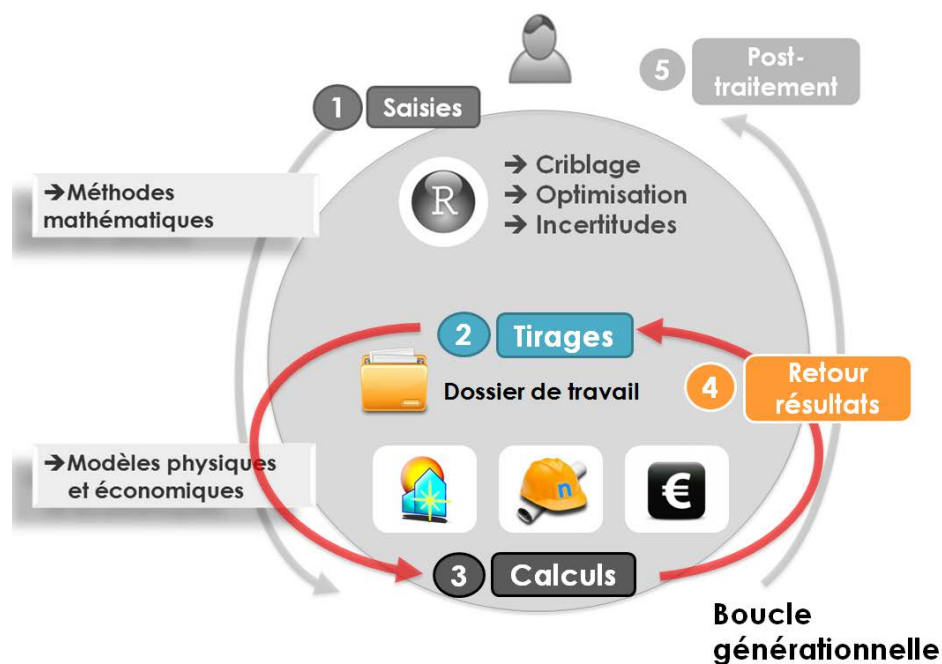


Figure 4-16. Mise en évidence de la boucle générationnelle, une des particularités de l'optimisation dans la plateforme logicielle

4.3.2. Étape n°2 : tirage

Le script « *Core* » de la méthode mathématique enclenché, un plan d'expériences concernant les paramètres étudiés est généré par la méthode. Ce plan est alors transmis, avec trois autres arguments génériques (le nom du fichier « *.plp* » relatif au projet *Pléiades*, la liste des sorties supplémentaires à calculer, et celle des sorties supplémentaires à calculer et à post-traiter) à la fonction « *manageSimulations* » du script « *ManagementSimulations.R* », décrite dans le § 4.4.1.3.

4.3.3. Étape n°3 : calculs

Pour mener l'ensemble des calculs demandés, la fonction « *manageSimulations* » crée à l'initialisation des calculs (*i.e.* avant la première itération), une arborescence de dossiers de travail pour l'étude menée. Illustrée dans la Figure 4-17, cette arborescence reprend les informations saisies par l'utilisateur lors de l'étape 1. Il peut ainsi être retrouvé le dossier de travail général (« C:\Rwd\ »), l'acronyme du PC (« INZ »), et le nom de la variante d'étude (« CO2VsCost_BeConstraint_BSOFamille\ »). Dans ce dossier propre à l'étude menée, plusieurs génériques sont créés :

- le sous-dossier « Resultats » ;
- les sous-dossiers « WdComfielInstance » ;
- les sous-dossiers « WdNovaEquerInstance » ;
- le dossier « Synthese_Optimisation ».

Les **sous-dossiers « WdComfielInstance »** correspondent aux dossiers de travail des instances de la *BlackBox COMFIE* qui vont être lancées pour réaliser de façon parallélisée les calculs. Ce sont à ces emplacements sur le disque dur que les fichiers d'entrée des *BlackBox* (§ 4.2.3.1) sont déposés. Les **sous-dossiers « WdNovaEquerInstance »** sont les équivalents de ces derniers pour *novaEQUER* (§ 4.2.3.2). Le **dossier « Resultats »** rassemble l'ensemble des fichiers textes de résultats bruts agrégés. Une explication plus détaillée est fournie dans l'étape 4 suivante. Le dossier « Synthese_Optimisation » regroupe les graphiques au format « .pdf » et les fichiers de résumé des populations qui ont été créés à la fréquence d'enregistrement choisie par l'utilisateur. Une description plus détaillée de ces résultats est donnée dans l'étape 4 (états intermédiaires) et dans l'étape 5 (état final).

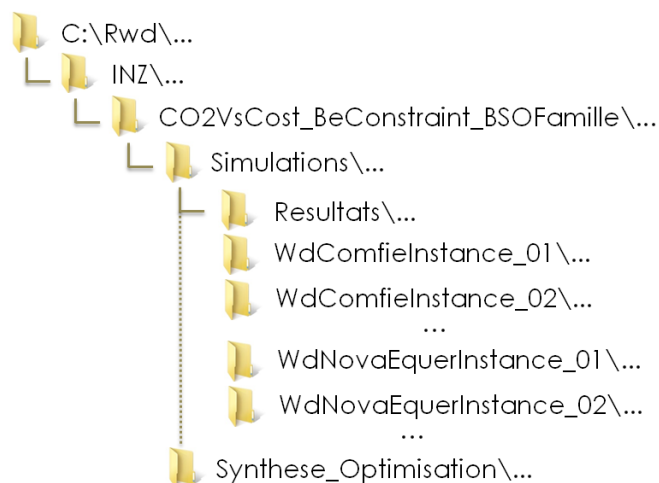


Figure 4-17. Illustration de l'arborescence de dossiers de travail créée par la fonction « *manageSimulations* », dans le cas de l'exemple retenu

Après avoir créé l'arborescence de dossiers de travail, la fonction « *manageSimulations* » remplira, jusqu'à ce que l'ensemble des calculs soit terminé, les objectifs principaux suivants :

- paralléliser au mieux les simulations sur les différentes instances des *BlackBox* appelées ;
- suivre l'état d'avancement global des simulations, et gérer en temps réel les erreurs, évitant que l'ensemble du processus ne plante.

Le plan d'expériences calculé, la fonction « *manageSimulations* » réalise le post-traitement partiel des sorties supplémentaires et des grandeurs d'intérêt de l'étude (détails en section 4.3.4). Le chemin des fichiers de résultats agrégés est retourné par la fonction au script « *Core* » qui était en attente durant cette phase de calculs, marquant le début de l'étape n° 4.

Notons ici à titre d'information que, dans le cas d'une étude « STD+ACV », l'ensemble des calculs STD sera réalisé avant d'initier l'ensemble des calculs ACV. Il est informatiquement tout à fait possible de faire suivre immédiatement le calcul ACV correspondant à un calcul STD puisque toutes les simulations sont indépendantes. Toutefois, dans le schéma retenu, les simulations sont passées par « bloc » ce qui permet de limiter le nombre d'opérations d'écriture et de lecture de fichiers textes, réduisant ainsi la durée d'exécution globale du processus.

4.3.4. Étape n°4 : retour des résultats

L'étape de retour des résultats a été esquissée précédemment. Elle consiste à agréger et à renvoyer au script « *Core* », les fichiers de résultats bruts pour les grandeurs d'intérêt de l'étude (objectifs et contraintes) et des sorties supplémentaires. Cette opération a été nommée « post-traitement partiel », à bien distinguer du post-traitement final en étape 5, consistant à générer automatiquement, à partir des résultats, les différents indicateurs et graphiques propres à la méthode mathématique conduite.

Pour illustrer plus précisément le post-traitement partiel, nous proposons de considérer l'exemple de la sortie « BAG » (pour Besoin de chauffage Annuel Global) comme une sortie dont les résultats sont à agréger. Dans ce cas, si 100 simulations ont été effectuées dans l'étape 3, 100 fichiers textes sous le format⁶⁴ « *Resultats_BAG_XXX.txt* » seront produits, avec XXX le numéro de la simulation. Les calculs ayant été parallélisés, ces fichiers textes de résultats se trouveront dans les différents dossiers de travail des instances de la *BlackBox*

⁶⁴ Ce format a été simplifié dans le cadre de l'exemple. En réalité, l'acronyme du PC est également spécifié dans le nom, ce qui offre la possibilité de gérer les calculs d'une étude sur plusieurs machines en même temps (Recht 2013)

appelée pour faire les calculs. La fonction « *manageSimulations* » va rechercher ces fichiers pour rassembler les résultats dans un unique fichier stocké dans le sous-dossier « *Resultats* », et nommé « *BAG_000001-000100.txt* ». C'est à partir de ce type de fichiers que le post-traitement final sera réalisé, suite à la fin des itérations. En effet, à la fin de l'étape 4, le script « *Core* » de la méthode mathématique utilisée évalue la valeur du critère d'arrêt considéré (ici un nombre fixé *a priori* de générations), et détermine si un nouveau cycle des étapes 2, 3 et 4 est à démarrer ou si, au contraire, l'étape 5 peut débuter.

4.3.5. Étape n°5 : post-traitement

Les fichiers de résultats agrégés (ceux présents dans le dossier « *Resultats* » de l'arborescence présentée) sont analysés par le script « *Core* » de la méthode utilisée. Pour des méthodes d'ASAI, le post-traitement des résultats conduira par exemple à la génération automatisée de graphiques de Morris (livrable L5.3 du projet ANR FIABILITÉ). Pour l'optimisation, trois types de sortie peuvent être obtenus pour chaque génération, et *a fortiori* pour la génération finale, achevant le processus d'optimisation :

- un fichier texte récapitulatif complet de la population à la génération considérée ;
- un graphique représentant, pour la population à la génération considérée, le front de Pareto par ses projections deux à deux dans l'espace des objectifs ;
- un graphique représentant, pour la population à la génération considérée, les caractéristiques de la population par ses projections deux à deux dans l'espace des décisions.

Enfin, à la fin du processus d'optimisation, un fichier texte de bilan sur l'optimisation est produit.

Le **fichier texte récapitulatif** complet d'une population à une génération donnée, noté « *SauvegardeGeneration_XX.txt* » avec *XX* le numéro de la génération, est structuré en deux blocs, juxtaposés en lignes :

- le premier bloc correspond à une matrice (μ, d) décrivant l'ensemble des valeurs des d caractéristiques des μ individus de la population, précédée d'une ligne d'en-tête avec le nom des caractéristiques ;
- le second bloc correspond à une matrice $(\mu, n + p + 2)$ décrivant, pour les μ individus de la population, les valeurs des n objectifs et des p contraintes, plus le rang du front de Pareto auquel cet individu appartient, et la valeur de la distance de Crowding lui étant associée.

Même si des graphiques sont générés automatiquement par le script « *Core* », ce fichier texte de récapitulatif permet de disposer de l'ensemble des données

sur la population pour retracer ces graphiques ultérieurement, ou pour en tracer d'autres.

La Figure 4-18 et la Figure 4-19 fournissent une illustration des **deux types de graphique** pouvant être obtenus à chaque génération, respectivement pour la génération 10 et la génération 21 (choisies arbitrairement) sur les 30 générations spécifiées dans l'exemple fil-rouge de cette partie. Bien que perfectibles, ces graphiques permettent par exemple à l'utilisateur de suivre en temps réel l'évolution de l'optimisation, ce qui peut s'avérer particulièrement utile pour détecter des anomalies ou pour observer la convergence de l'algorithme.

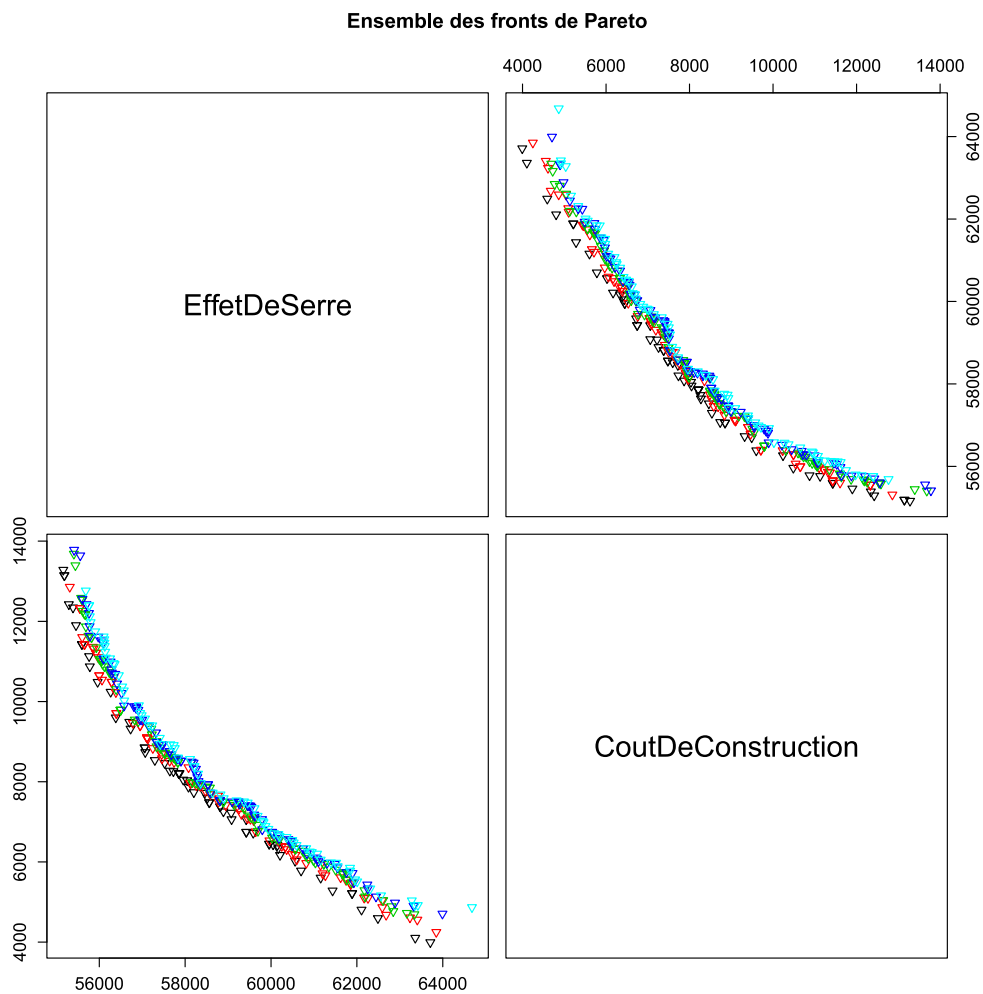


Figure 4-18. Illustration de graphiques pouvant être générés automatiquement à chaque génération du processus d'optimisation – cas des projections deux à deux des performances des individus de la population de la génération 10 sur 30

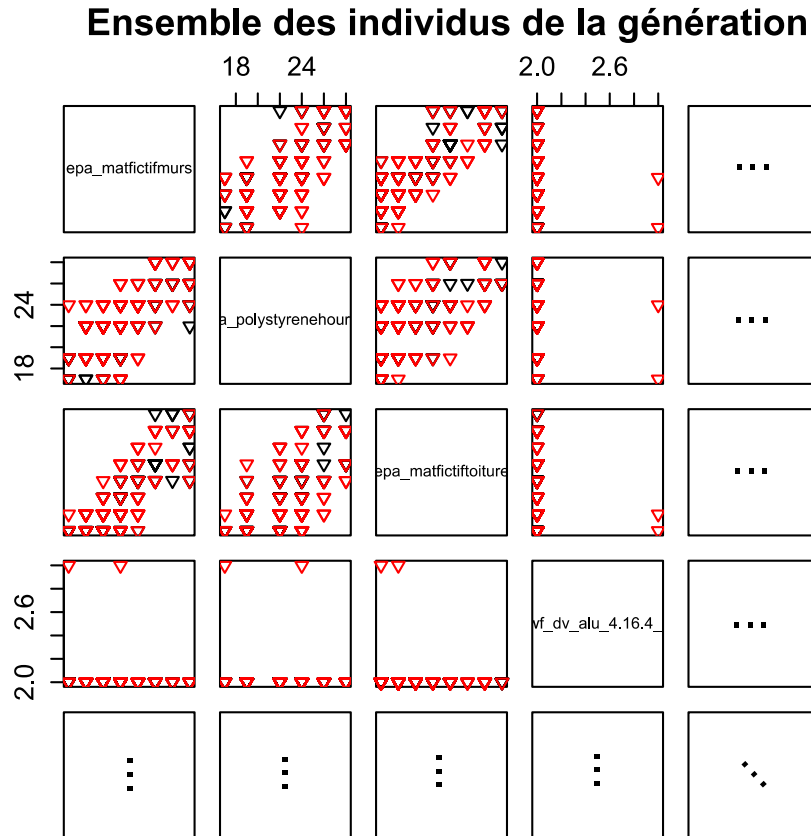


Figure 4-19. Illustration des graphiques pouvant être générés automatiquement à chaque génération du processus d'optimisation – cas des quatre premières caractéristiques des individus de la population de la génération 21 sur 30

Concernant, le fichier texte de bilan final de l'optimisation, noté « *BilanOptimisation.txt* », il résume tout d'abord, et en lignes, les informations suivantes :

- nombre de bits considéré pour chaque paramètre ;
- taille de la population ;
- nombre de générations ;
- probabilité de croisement ;
- probabilité de mutation ;
- dimension de l'espace des paramètres ;
- dimension de l'espace des objectifs ;
- dimension de l'espace des contraintes.

Ensuite, il rappelle, en lignes, les limites haute puis basse pour chaque paramètre. Enfin, des statistiques sur l'ensemble de l'optimisation sont données, en lignes :

- nombre total de croisements effectués ;
- nombre total de mutations effectuées ;
- pourcentage moyen de croisement par génération ;
- pourcentage moyen de mutation par génération.

Ces statiques peuvent permettre un certain nombre de vérifications *a posteriori* sur l'étude menée. Dans la Figure 4-20, il peut par exemple être observé que les pourcentages moyens de croisement et de mutation par génération présentent ici des valeurs conformes à celles saisies en début d'étude.

```
#####
Pourcentage moyen de croisement par génération...78.925
Pourcentage moyen de mutation par génération...15.204...
#####
```

Figure 4-20. Illustration de sorties du fichier « BilanOptimisation.txt », cas des pourcentages moyens de croisement et de mutation par génération.

4.4. PRINCIPAUX DÉVELOPPEMENTS RÉALISÉS

Après avoir donné une vue d'ensemble, en présentant les principales briques constitutives de la plateforme développée (partie 4.2) et la façon dont elles interagissent (partie 4.3), cette partie a pour objectif de mettre davantage en évidence les principales contributions spécifiquement apportées dans le cadre de cette thèse. Différents aspects informatiques y sont présentés, et certaines contributions résumées, avec des renvois vers des annexes ou d'autres parties de ce chapitre.

4.4.1. Travaux informatiques concernant R

Les travaux réalisés concernant R peuvent être distingués en trois développements principaux (abordés dans cet ordre dans la suite) :

- développement des méthodes d'ASAI ;
- développement de l'algorithme NSGA-II ;
- développement du script « *SimulationsManagement.R* ».

4.4.1.1. SCRIPTS ASAI

Les méthodes d'analyses de sensibilité et d'analyse d'incertitude (ASAI) correspondent à la première catégorie de méthodes rendues disponibles pour mener des variations paramétriques automatisées. Ce travail informatique (section 4.2.2), qui a débuté aux côtés de Munaretto (Recht 2013) s'est poursuivi dans la première partie de la thèse, répondant aux besoins du chapitre 2. Il a notamment consisté à développer des scripts exploitant des fonctions

spécialisées de différents *packages* de *R*, pour permettre de mener, sur les *BlackBox COMFIE* et *novaEQUER* :

- une opération de criblage (méthode de Morris) ;
- une propagation d'incertitudes (avec un tirage LHS ou par séquences de Sobol) ;
- une analyse de sensibilité globale (via le calcul des indices de Sobol).

Les deux principaux *packages* exploités ont été :

- le package « *sensitivity* » (Pujol et al. 2016), contenant, entre autres, les fonctions « *morris* » et différentes méthodes d'estimation des indices de Sobol dont « *sobol2007* » par exemple ;
- et le package « *lhs* » (Carnell 2016), contenant, entre autres, la fonction « *randomLHS* ».

Le livrable L5.3 du projet ANR FIABILITÉ permet de fournir une vue d'ensemble assez complète sur ce travail. Aussi, nous ne le développerons pas davantage ici.

4.4.1.2. SCRIPTS « *NSGA2_INTERFACE.R* » ET « *NSGA2_CORE.R* »

Les scripts « *NSGA-II_Interface.R* » et « *NSGA-II_Core.R* », que nous avons développés pour mettre en œuvre l'algorithme génétique NSGA-II utilisé dans cette thèse (§ 3.2.4.2), sont issus d'un travail en collaboration avec Charles Garnier.

Pour simplifier la présentation, ce travail sera décomposé en deux phases, dont le développement était coordonné :

- implémentation de l'algorithme génétique retenu (Garnier) ;
- son couplage à la plateforme (Recht).

❖ Implémentation de l'algorithme NSGA-II

À l'instar des fonctions « *morris* » ou « *sobol2007* » pour les ASAI, nous avons cherché à identifier, sur le site du CRAN, des *packages* déjà existants mettant en œuvre l'algorithme NSGA-II. Notre choix s'est porté sur le package « *mco* » (Mersmann et al. 2014), développé par l'université technique de Dortmund, et sa fonction principale « *nsga2* ». Malgré sa proximité avec nos besoins, deux adaptations ont été nécessaires, et expliquent cette première phase de travail. L'obstacle majeur à l'utilisation de la fonction « *nsga2* » dans sa version initiale est la nécessité de saisir une expression analytique des fonctions objectifs à minimiser, or celle-ci est difficilement accessible voire inaccessible pour les modèles complexes d'évaluation (énergétique et environnementale) des bâtiments que nous utilisons. L'autre limitation à son utilisation directe concerne les opérateurs implémentés : il s'agit d'opérateurs continus et non génétiques (§ 3.2.4.2).

Le fichier source de la librairie « *mco* », codé en C, a dû être modifié pour :

- découper en sous-fonctions la fonction « *nsga2* » ;
- et implémenter les opérateurs génétiques choisis.

Le fait de disposer de sous-fonctions permet d'apporter la flexibilité nécessaire pour s'adapter à la plateforme existante, et fournir directement les valeurs des fonctions objectifs⁶⁵. Une fois les opérateurs génétiques implémentés dans le fichier source « .c » de la fonction « *nsga2* », les sous-fonctions suivantes ont été considérées :

- « *assign_rank_and_crowding_distance* », permettant d'assigner le rang du front de Pareto et la distance de « *crowding* » à tous les individus d'une population ;
- « *selection* », permettant d'effectuer la sélection par tournoi de foule pour la reproduction et le croisement ;
- « *mutation_pop* », permettant d'opérer les mutations sur les enfants issus du croisement précédent ;
- « *fill_nondominated_sort* », permettant d'effectuer la sélection pour remplacement.

Pour rendre accessibles dans *R* ces sous-fonctions en C, nous nous sommes appuyés sur le document « *Programmation en R : incorporation de code C et création de packages* » rédigé par Baillargean (2007). Le principe consiste à :

1. compiler, à l'aide d'un compilateur C, le code source en C en une librairie dynamique (.dll) ;
2. charger le code compilé dans *R*, à l'aide de la fonction « *dyn.load* » ;
3. rendre accessible le code chargé en des fonctions *R*, à l'aide de la fonction « *.C* ».

Ces différentes tâches effectuées ont permis de disposer, sous forme de fonctions *R* directement appelables au sein de la plateforme, de l'ensemble des procédures de l'algorithme génétique que nous souhaitions mettre en place. Ajoutons que nous avons implémenté une méthode d'identification du front plus efficace que celle présente dans le package « *mco* » (Annexe G).

Pour vérifier que les adaptations réalisées n'avaient pas introduit de bugs, nous avons mené une démarche de validation analytique sur plusieurs problèmes tests dont quatre utilisés par Deb dans son article sur l'algorithme NSGA-II (Deb et al. 2002b). Ces problèmes sont décrits dans le Tableau 4-1, et ont permis de confirmer les performances attendues de l'algorithme construit, validant le travail d'adaptation de la fonction « *nsga2* ».

⁶⁵ L'approche opposée, qui aurait consisté à encapsuler les modèles dans la fonction « *nsga2* », était effectivement contraire à l'esprit modulaire de la plateforme déjà développée. L'ensemble des fonctionnalités du script « *SimulationsManagement.R* » (§ 4.4.1.3) pour mener et gérer automatiquement les calculs STD et ACV, aurait été à recoder en C, en plus de ne pas être directement accessible pour d'autres méthodes (ASAI, calibrage...).

Tableau 4-1 : Problèmes tests considérés lors de la démarche de validation analytique menée, d'après Deb et al. (2002)

Problème	n	Bornes	Composantes des fonctions
SCH	1	$[-10^3; 10^3]$	$\begin{cases} f_1(x) = x^2 \\ f_2(x) = (x - 2)^2 \end{cases}$
FON	3	$[-4; 4]$	$\begin{cases} f_1(x) = 1 - \exp \left(- \sum_{i=1}^3 \left(x_i - \frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 \right) \\ f_2(x) = 1 - \exp \left(- \sum_{i=1}^3 \left(x_i + \frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 \right) \end{cases}$
POL	2	$[-\pi; \pi]$	$\begin{cases} f_1(x) = [1 + (A_1 - B_1)^2 + (A_2 - B_2)^2] \\ f_2(x) = [(x_1 + 3)^2 + (x_2 + 1)^2] \end{cases}$ avec : $\begin{cases} A_1 = 0,5 \times \sin 1 - 2 \times \cos 2 + \sin 2 - 1,5 \times \cos 2 \\ A_2 = 1,5 \times \sin 1 - \cos 1 + 2 \times \sin 2 - 0,5 \times \cos 2 \\ B_1 = 0,5 \times \sin x_1 - 2 \times \cos x_1 + \sin x_2 - 1,5 \times \cos x_2 \\ B_2 = 1,5 \times \sin x_1 - 2 \times \cos x_1 + 2 \times \sin x_2 - 0,5 \times \cos x_2 \end{cases}$
KUR	3	$[-5; 5]$	$\begin{cases} f_1(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left(-10 \exp \left(-0,2 \times \sqrt{x_i^2 + x_{i+1}^2} \right) \right) \\ f_2(x) = \sum_{i=1}^n (x_i ^{0,8} + 5 \times \sin x_i^3) \end{cases}$

n : nombre de variables des fonctions tests

❖ Couplage de l'algorithme avec la plateforme

Les fonctions élémentaires de l'algorithme génétique choisi étant disponibles, la seconde phase de notre travail a consisté à développer, à l'instar des scripts ASAI, un script « *NSGA2_Interface.R* » et un script « *NSGA2_Core.R* ». Néanmoins, grâce à l'expérience accumulée par ce précédent développement sur les ASAI, nous avons pu tout de suite créer des scripts automatisés et génériques. Le premier a été largement décrit à travers l'exemple fil rouge de la partie 4.3. Le second comporte environ un millier de lignes de code dont environ un tiers correspond à des commentaires pour faciliter sa compréhension. Nous en présentons le déroulé algorithmique général ci-après :

- **Initialisation générale** : dont chargement de *packages* et de fonctions externes (telles que celles développées précédemment).
- **Déclaration de paramètres avancés** : par exemple, la racine des fichiers résultats (« *Resultats* »), le nom du fichier « *Config.txt* », etc. Ces paramètres « experts » n'ont effectivement pas *a priori* d'intérêt pour l'utilisateur final, c'est pourquoi ils ont été placés dans le script

« NSGA2_Core » afin de ne pas surcharger l'interface. Ils peuvent néanmoins y être réintroduits à tout moment.

- **Déclaration et initialisation des variables** : par exemple, la matrice qui contiendra le génome d'une population en représentation binaire, celle en représentation réelle (nécessaire pour transmettre les valeurs physiques aux modèles de STD et d'ACV), etc.
- **Initialisation aléatoire de la population** : tirage aléatoire de 0 et de 1 pour charger l'ensemble des bits représentant l'information génétique de la population initiale.
- **Décodage du génotype en phénotype** : pour créer le fichier « Parametres.txt » avec des valeurs réelles.
- **Évaluation des individus** : par appel de la fonction « *manageSimulations* » (§ 4.4.1.3), et récupération des performances.
- **Début de la boucle générationnelle** :
 - o **sélection pour reproduction et croisement** : par appel de la fonction « *selection* » ;
 - o **mutation** : par appel de la fonction « *mutation* » ;
 - o **décodage du génotype en phénotype** ;
 - o **évaluation des enfants** : par appel de la fonction « *manageSimulations* » (§ 4.4.1.3), et récupération des performances ;
 - o **sélection pour remplacement** : par appel à la fonction « *fill_nondominated_sort* » ;
 - o **génération des résultats** pouvant être produits à chaque itération.
- **Fin de la boucle générationnelle.**
- **Post-traitement des résultats** : comprenant la génération du fichier texte « *BilanOptimisation.txt* », décrit dans la section 4.3.5.

Sans les détailler, signalons néanmoins que plusieurs travaux ont été réalisés à l'intérieur de ce code pour en optimiser son exécution. Par exemple, une procédure a été ajoutée avant l'étape d'évaluation des enfants pour identifier et supprimer dans le fichier « *Parametres.txt* » les éventuels doublons présents dans la population, tout en les conservant dans le processus génétique (la matrice des fonctions objectifs est re-complétée *a posteriori* de l'évaluation). Cette procédure évite de réaliser des simulations identiques durant la même génération, permettant de réduire significativement les calculs.

4.4.1.3. LE SCRIPT « *SIMULATIONSMANAGEMENT.R* »

Dans les deux paragraphes précédents (§ 4.4.1.1 et § 4.4.1.2), nous avons montré les développements effectués pour disposer de scripts permettant de mettre en œuvre plusieurs méthodes mathématiques (ASAI et optimisation

multicritère). Cet ensemble de scripts peut être considéré comme la chaîne « amont » de la plateforme, où, par opposition, l'ensemble des modèles d'évaluation (STD, ACV, économique...) définit la chaîne « aval ». À l'interface entre ces deux chaînes, le script « *SimulationsManagement* » correspond à l'une de nos contributions à la plateforme collective développée. Nous en présentons l'essentiel ci-après.

❖ Origine

Le script « *SimulationsManagement.R* » répond à une volonté de dissocier ce qui a trait aux méthodes mathématiques de ce qui relève de la réalisation et la gestion des simulations correspondantes. Initié par Robillart (2015) pour le cas spécifique du calibrage de modèles, nous avons prolongé ce travail pour généraliser la fonction développée, et la déployer à l'ensemble des méthodes disponibles dans la plateforme.

Le grand atout du script « *SimulationsManagement.R* » est ainsi de permettre une commande automatisée de toute la chaîne logicielle « aval », et de ne pas être lié de manière rigide à une chaîne « amont ». De part cette flexibilité, des possibilités d'interopérabilité sont ouvertes. En effet, dans l'optique de collaborations avec d'autres équipes de recherche, il pourrait être envisagé de profiter du script « *SimulationsManagement.R* » pour réaliser, à partir de plans d'expérience issus d'autres chaînes « amont » (p. ex. développés sous *Python* ou *Matlab*), les calculs avec la chaîne « aval » *COMFIE+novaEQUER*. La Figure 4-21 vise à illustrer cette possibilité. Par rapport à son extension actuelle (*.R*), il faudrait néanmoins convertir ce script en un *.exe* pour rendre opérationnelle cette possibilité.

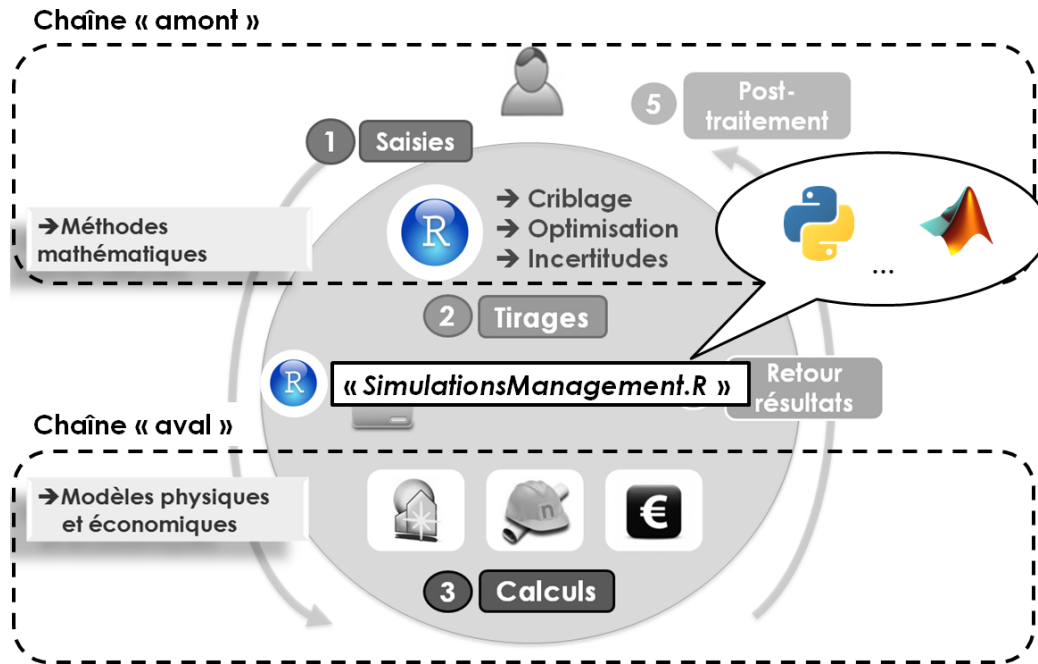


Figure 4-21. Positionnement du script « SimulationsManagement.R » au sein de la plateforme de simulation, et illustration de la possibilité d'interopérabilité de la chaîne « aval » avec d'autres chaînes « amont » que celle de la plateforme

❖ La fonction principale « *manageSimulations* »

Toutes les commandes relatives à la réalisation et la gestion des simulations ont été retirées des scripts « méthodes » et rassemblées dans le script « *Simulationsmanagement.R* ». De plus, elles ont été transformées en des sous-fonctions élémentaires, permettant de simplifier (lorsque certaines commandes sont appelées plusieurs fois) et de mieux structurer le code. En effet, ce script représente environ 2 000 lignes même si, à l'instar des autres scripts, une partie significative correspond à des commentaires. À partir de ces sous-fonctions élémentaires, la fonction principale de ce script, notée « *manageSimulations* », a été développée. Les principaux rôles de cette fonction sont :

- de créer une arborescence de dossiers de travail en adéquation avec la puissance de calcul de l'ordinateur (cf. ci-après) ;
- de mener l'ensemble des calculs de façon parallélisée (cf. ci-après) ;
- de superviser les calculs et de gérer les erreurs courantes.

La Figure 4-22 présente les entrées et les sorties de cette fonction. À partir du chemin du fichier « *Config.txt* », la fonction déduit le dossier de travail général, et reconstruit automatiquement le chemin du fichier « *Parametres.txt* » pour lire le plan d'expériences à calculer. Grâce à la convention de nommage (§ 4.4.2.1 et Annexe E), le plan est filtré entre les paramètres propres à la STD, et ceux propres à l'ACV, afin de pouvoir transmettre aux *BlackBox COMFIE* et *novaEQUER* uniquement les valeurs des paramètres les concernant. Les deux autres entrées

permettent à la fonction de savoir quelles sorties seront à partiellement post-traiter ou non⁶⁶. Avec le projet « .plp », ces trois fichiers sont alors copiés dans tous les dossiers de travail des instances de la *BlackBox COMFIE*, ce qui permet de les appeler pour réaliser les calculs (pour rappel, étape 3 en 4.3.3). L'ensemble des calculs STD achevé, la fonction récupère alors les sorties nécessaires pour les calculs ACV. Ces données sont obtenues par la lecture de fichiers « .neq-box-script » (Annexe F) partiels générés par les *BlackBox COMFIE* (cela sera détaillé § 4.4.3.1). Ces fichiers partiels sont alors complétés par les données ACV présentes dans le fichier global des paramètres filtré pour l'ACV. Les fichiers « .neq-box-script » complets peuvent alors être transmis aux *BlackBox novaEQUER* pour les calculs. Les calculs ACV terminés, le post-traitement partiel de la fonction « *manageSimulations* » peut avoir lieu avant son arrêt.

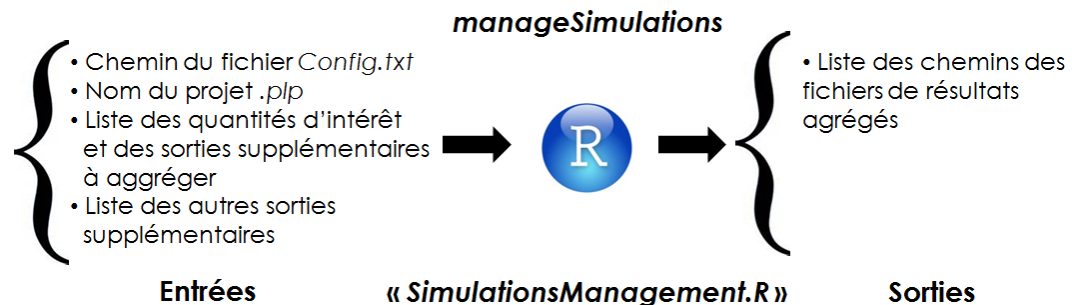


Figure 4-22. Entrées et sorties de la fonction « *manageSimulations* »

Pendant tout ce processus, une supervision des calculs a lieu, et permet d'informer en temps réel l'utilisateur sur l'état d'avancement. La Figure 4-23 illustre les informations pouvant être affichées au cours du processus. En fin de processus, quelques statistiques sont également fournies à l'utilisateur (durée totale des simulations, temps moyen par simulation, etc.).

⁶⁶ Cette information est effectivement non présente actuellement dans le fichier Config.txt (une ligne avec la liste de toutes les sorties de manière indifférenciée), mais il pourrait être envisagé de l'inclure tout simplement en fournissant en deux lignes, deux listes différenciées de sortie, et en modifiant le code de la *BlackBox* pour lui indiquer qu'une ligne supplémentaire est à lire concernant les sorties à générer. Cette perspective permettrait de réduire les entrées de la fonction *manageSimulations* mais n'apporte pas de changement fondamental, et est pour l'instant, un développement non prioritaire.

```

"-----"
"Avancement à 2016-04-31 18:13:16 : 20 %"
"-----"
"Instance n°1: simulation n°2 en cours. Simulation lancée depuis 3 seconde(s)."
"Instance n°2: simulation n°13 en cours. Simulation lancée depuis 6 seconde(s)."
"Instance n°3: simulation n°23 en cours. Simulation lancée depuis 9 seconde(s)."
"Instance n°4: simulation n°32 en cours. Simulation lancée depuis 9 seconde(s)."
"Instance n°5: simulation n°44 débutée. Simulation n°43 effectuée avec succès."
"Instance n°6: simulation n°53 en cours. Simulation lancée depuis 3 seconde(s)."
"Instance n°7: simulation n°64 débutée. Simulation n°63 effectuée avec succès."
"Instance n°8: simulation n°74 débutée. Simulation n°73 effectuée avec succès."
"Instance n°9: simulation n°82 en cours. Simulation lancée depuis 9 seconde(s)."
"Instance n°10: simulation n°93 en cours. Simulation lancée depuis 6 seconde(s)."

```

Figure 4-23. Suivi proposé à l'utilisateur de l'avancement des simulations

Sur les milliers de simulations lancées, il arrive que quelques-unes plantent, sans cause clairement identifiée pour l'heure, et ce, de manière « aléatoire ». De rares saturations d'accès au disque dur pourraient expliquer le problème rencontré où le fichier « .plp » ne peut être lu au lancement de la *BlackBox*, s'éteignant juste après sans avoir réalisé la simulation. En attendant de pouvoir traiter la cause, une procédure de suivi permet de relancer la simulation en question si elle n'a pu être réalisée dans un délai imparti. La méthode de parallélisation des calculs pourrait également être la cause de ce problème.

❖ **Parallélisation des calculs sur les processeurs à multi-cœurs (*hyperthreadés* ou non)**

Les processeurs à plusieurs cœurs (dits multi-cœurs), équipent aujourd'hui de manière systématique les ordinateurs de bureau récents proposés sur le marché. Cette technologie, basée sur la multiplication des unités de calcul (les cœurs) du processeur, permet de nos jours d'effectuer simultanément des tâches informatiques. Dans le but de proposer des démarches d'aide à la conception les plus rapides possibles pour les professionnels, une partie du développement de la plateforme s'est donc rapidement axée sur les possibilités de distribuer les calculs (Recht 2013), et notamment sur les différents cœurs d'un même processeur. En effet, même si les outils *COMFIE* et *novaEQUER* n'ont pas été conçus pour être parallélisés à l'intérieur même d'une simulation (les processeurs multi-cœurs n'existaient pas pour les ordinateurs de bureau à l'époque où ils ont été créés), le fait que les simulations à réaliser soient indépendantes offre tout de même la possibilité d'exploiter le caractère multi-cœurs des processeurs actuels. Les gains pouvant être obtenus sont substantiels, comme l'illustre la Figure 4-24, où le « temps moyen par simulation » correspond au nombre total de simulations lancées (ici 1 430) sur la durée globale pour les réaliser. Cette étude de cas a été menée avec un ordinateur disposant de 6 cœurs. Si le temps moyen de calcul n'a pas été divisé par deux en doublant le nombre de parallélisations (des effets de saturation des communications et de l'accès au disque peuvent l'expliquer), il

a néanmoins été réduit pratiquement d'un facteur 5 en parallélisant 8 fois, et d'un facteur 5,5 avec 12 parallélisations. Empiriquement, il peut être constaté que le nombre optimal de parallélisations à opérer est égal, dans le cas des processeurs *hyperthreadés*, au nombre de *threads* (ici le double du nombre de cœurs).

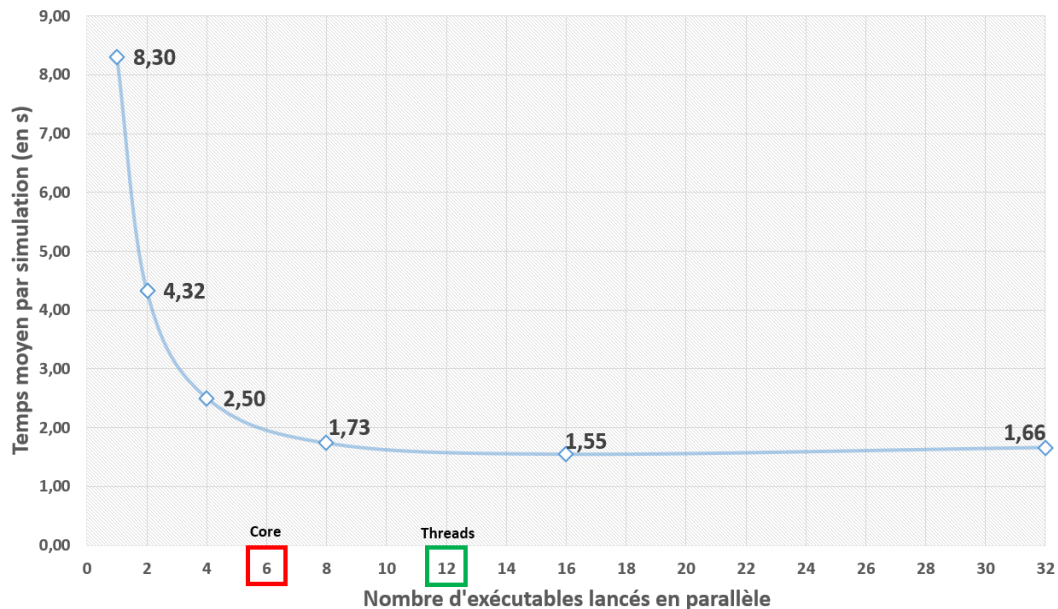


Figure 4-24. Gains obtenus par parallélisation sur un processeur multi-cœurs hyperthreadés, tirée de Recht (2013)

Dans cette optique, une procédure de parallélisation a été développée et implémentée dans la fonction « *manageSimulations* ». Une étape préliminaire consiste à identifier automatiquement le nombre de cœurs et de *threads* de l'ordinateur utilisé, pour déterminer, selon la loi empirique ci-avant, le nombre optimal de parallélisations à opérer. Cette étape effectuée, le processus de parallélisation développé consiste à appeler autant d'instances des *BlackBox* que ce nombre optimal, et de les alimenter en simulations par « paquet ». Si 1 200 simulations sont à réaliser par 12 instances, la fonction « *manageSimulations* » ne transmettra pas 100 simulations à chaque instance mais bien plutôt un « paquet » de taille inférieure (ex. 10 simulations). Ensuite, dès qu'une instance terminera son « paquet » de simulations, la fonction lui transmettra un nouveau « paquet » à réaliser, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'ensemble des simulations soit réalisé. Si cette démarche est perfectible, et pourrait être améliorée grâce à des méthodes dédiées, par exemple le package *R* « *parallel* » (R-core 2015), l'efficacité constatée en pratique (seules quelques dizaines de secondes au maximum séparent les moments où la première et la dernière instance actives s'arrêtent), n'a pas conduit à envisager un développement plus sophistiqué. Ce même procédé a été reproduit par M.-L. Pannier pour les *BlackBox novaEQUER*.

4.4.2. Travaux informatiques concernant COMFIE

Cette section vise à présenter nos contributions concernant *COMFIE*, et plus précisément à la branche *UASA* de *COMFIE*, dédiée aux variations paramétriques automatisées. Le premier développement, ayant conduit à l'élaboration d'une convention de nommage rendant la *BlackBox COMFIE* applicable à tout projet de bâtiment, a été mené en collaboration avec F. Munaretto puis J. Barbaud, comme introduit dans le § 4.2.2.1. Le second développement a concerné une procédure spécifique permettant, sur l'étude de cas considérée dans ces travaux de thèse uniquement, de s'affranchir d'un des principaux verrous de la plateforme sous son format existant, à savoir la variation de certains paramètres liés à la géométrie.

Les autres développements concernent des développements individuels plus minoritaires, et pour partie, uniquement valables pour l'étude de cas considérée dans ces travaux de thèse.

4.4.2.1. CONVENTION DE NOMMAGE

Pour mener des variations paramétriques automatisées, il faut être en mesure de connaître l'adresse en mémoire vive des paramètres à modifier. Si cette correspondance a été réalisée manuellement lors de la première application de la *BlackBox COMFIE* sur la maison INCAS I-BB étudiée (§ 1.1.4.2 et section 2.3.3) nous avons par la suite élaboré une convention de nommage des paramètres pour réaliser cette correspondance de manière automatique.

Illustrons ceci sur un exemple : dans la maison INCAS étudiée, le béton dans les murs correspondait au troisième matériau recensé dans le tableau, stocké en mémoire vive, des matériaux du projet. Pour en modifier sa conductivité, l'adresse « *mon_Batiment.ADRESSE_MAT[3]^lambda* » avait alors été utilisée dans les procédures de variations automatisées. Or, cette liste de matériaux évolue selon ceux mis en œuvre dans chaque projet, et aucun lien *a priori* n'existe entre un matériau et sa position dans la liste des matériaux d'un projet. À chaque nouveau projet, voire à chaque évolution majeure de celui-ci, cette correspondance doit être reprise, ce qui constitue une tâche fastidieuse et potentiellement à risque, en matière d'erreurs de correspondance pouvant être générées. De plus, un ordre était à respecter dans l'exécution des procédures de modifications à effectuer. En effet, les d paramètres étudiés étant rangés en colonnes dans un certain ordre (*a priori* quelconque), le parcours dans un ordre croissant des d colonnes de ce plan nécessitait que les procédures de variation s'exécutent en respectant cet ordre de rangement des d paramètres.

Pour lever ces limitations, la convention de nommage que nous avons élaborée consiste à transmettre, via un nom codifié, les informations nécessaires à la *BlackBox* pour identifier, de manière automatique, l'adresse de chaque paramètre étudié. De manière générale, un préfixe de trois lettres est imposé au début du nom, permettant de transmettre le type du paramètre considéré, et le reste de ce nom codifié correspond au nom de ce paramètre. L'Annexe E fournit cette convention de nommage. Pour reprendre l'exemple précédent, le nom codifié du paramètre relatif à la conductivité du béton sera « Con-Beton », avec « Con » le préfixe désignant le type « conductivité », et « Beton » le nom du matériau béton dans le projet « .plp ». Sachant ce type, une procédure dans la *BlackBox* parcourt la liste des noms des matériaux à la recherche d'un matériau nommé « Beton », et sauvegarde la position trouvée. La correspondance est faite.

Si le principe est relativement simple, sa mise en œuvre étendue à tout le modèle a représenté un travail conséquent. Il a en effet fallu développer les procédures de correspondance pour tous les types de paramètres souhaités, avec souvent, des problématiques d'implémentation informatique spécifiques à chaque type. À la suite de ces développements, nous avons mené en collaboration avec M. Robillart, une démarche de validation numérique (§ 4.2.2.1).

Du fait de l'architecture particulière de l'environnement *Pléiades*, certains paramètres n'avaient pas pu être intégrés. C'est l'objet du paragraphe suivant.

4.4.2.2. VARIATION DE CERTAINS PARAMÈTRES LIÉS À LA GÉOMÉTRIE : PRINCIPALE DIFFICULTÉ ET LIMITE DE LA PLATEFORME EXISTANTE

L'environnement *Pléiades* correspond à une suite logicielle, présentée au début de ce chapitre (4.2.1), qui résulte de l'ajout successif de « couches » logicielles. En effet, seul le cœur de calcul *COMFIE* existait historiquement, et les informations de tout le projet étaient saisies « à la main » dans des fichiers textes. L'arrivée de l'interface *Pléiades* a permis de faciliter la saisie des caractéristiques du projet sous l'extension « .plp », et de générer automatiquement les fichiers textes pour *COMFIE*. Enfin, la diffusion du modèleur graphique *Alcyone* a rendu possible une saisie de la géométrie complète du bâtiment sous l'extension « .alcp ». La difficulté d'intégrer certains paramètres liés à la géométrie résulte de cette architecture, et peut être illustrée sur un exemple. Dans le fichier « .alcp », la géométrie complète du bâtiment est sauvegardée. Or, lorsque les informations sont transmises à *Pléiades*, via la génération d'un fichier « .plp », une partie des informations est perdue. À ce stade, le bâtiment a effectivement été décomposé en zones thermiques, elles-mêmes composées de parois de zones. Les fichiers textes d'entrée du cœur de calcul *COMFIE* nécessitant des valeurs de surface,

Pléiades résume la hauteur et la largeur des parois par une surface, perdant ainsi ces informations. La *BlackBox* se situant après cette étape de génération des fichiers textes pour *COMFIE*, elle ne dispose plus que de cet ensemble réduit d'informations concernant la géométrie, rendant difficile la variation automatisée de certains paramètres y étant associés.

Dans l'étude de cas considérée, nous avons par exemple fait varier les proportions de surface vitrée, ce qui implique de recalculer les ponts thermiques associés aux menuiseries. Or, dans *COMFIE*, les ponts thermiques de chaque paroi sont sommés et résumés dans une valeur unique pour les calculs. Sauf exception, il n'est donc plus possible de retrouver la valeur des ponts thermiques par surface, ou par mètre linéique, et donc de recalculer cette valeur unique avec les dimensions modifiées. Pour pallier cette limitation dans le cadre de l'étude de cas traitée dans ces travaux, nous avons introduit manuellement les informations manquantes, et implémenté les procédures nécessaires pour recalculer ces valeurs uniques de ponts thermiques par zone. Si des démarches de validation ont permis de vérifier que les procédures développées permettaient de réaliser les variations désirées sur l'étude de cas considérée, elles ne sont valables que pour ce projet, et n'ont pas apporté de réponse globale à cette problématique. Comme nous le signalons dans le § 4.4.5.3, des développements récents ont permis de traiter plus globalement ce sujet, et d'y répondre de manière satisfaisante.

4.4.3. Travaux informatiques concernant novaEQUER

Cette section vise à présenter nos contributions concernant *novaEQUER*. La création d'un interfaçage générique entre la *BlackBox COMFIE* et la *BlackBox novaEQUER*, rendant possible la réalisation de variations paramétriques automatisées en ACV, constitue le développement majeur que nous avons réalisé pour ce composant de la plateforme (§ 4.2.2.2).

4.4.3.1. INTERFAÇAGE DES BLACKBOX COMFIE ET NOVAEQUER

Les travaux pionniers de Munaretto (2014) ont montré, sur une étude de cas, la faisabilité de faire communiquer les *BlackBox COMFIE* et *EQUER* pour mener des variations paramétriques automatisées à la fois en simulation thermique dynamique et en simulation du cycle de vie. Pour répondre aux besoins spécifiques de la thèse, visant à évaluer les impacts environnementaux dans une démarche d'écoconception, nous avons adapté ces travaux à *novaEQUER* (l'évolution d'*EQUER*) et les avons généralisés à tout projet de bâtiment. En prenant la Figure 4-25 comme support, nous proposons de présenter, en suivant

les étapes affichées, les différentes phases de travail réalisées, et en quoi elles ont consisté.

La première phase de ce travail a consisté à établir une convention de nommage pour les paramètres ACV et de l'intégrer dans le script « *SimulationsManagement.R* » de sorte que le plan d'expériences issu de la méthode mathématique utilisée (étape 1 de la Figure 4-25) puisse être subdivisée en deux sous-plans, l'un ne contenant que les paramètres STD (« *STDParametres.txt* »), et l'autre uniquement les paramètres ACV. Cette phase permet d'une part, de fournir un plan d'expériences adéquat à la *BlackBox COMFIE* (étape 2 de la Figure 4-25), mais aussi de préparer celui pour la *BlackBox novaEQUER*. La seconde phase de ce travail, et la plus conséquente, a concerné la création de procédures génériques dans le code de la *BlackBox COMFIE* (i.e. dans celui de la branche UASA) pour extraire toutes les informations nécessaires du projet et des simulations STD en vue de réaliser les calculs ACV. Ces informations, regroupées dans un fichier « *.neq-box-script* » (étape 3 de la Figure 4-24) généré à la fin des simulations STD, comprennent généralement :

- le volume de tous les matériaux de construction du projet ;
- l'aire de toutes les surfaces du projet (revêtements, menuiseries, etc.) ;
- les besoins de chauffage et de climatisation (*a minima* annuels, horaires si un mix énergétique dynamique est envisagé) ;
- la consommation d'électricité spécifique (*a minima* annuels, horaires si un mix énergétique dynamique est envisagé) ; en réalité, il est supposé que la consommation électrique est égale à la puissance dissipée des scénarios *Pléiades* (§ 4.4.3.3) ;
- les productions d'énergie renouvelable (*a minima* annuels, horaires si un mix énergétique dynamique est envisagé) ;
- le nombre d'occupants.

Des problématiques en lien avec la perte d'informations entre *Pléiades* et *COMFIE* ont rendu complexes le développement de plusieurs procédures, même si des contournements ont toujours été possibles. Par exemple, dans les calculs faits par *COMFIE*, les portes intérieures sont converties en une valeur de pont thermique, rendant leur identification et la réalisation du quantitatif délicates.

Cette tâche réalisée, la troisième phase du travail a consisté développer des commandes dans le script « *SimulationsManagement.R* » pour aller lire l'ensemble des « *.neq-box-script* » partiels issus de la *BlackBox COMFIE* pour les compléter avec les données contenues dans le plan d'expérience propre aux paramètres ACV, afin de transmettre des « *.neq-box-script* » complets à la *BlackBox novaEQUER*, permettant de réaliser les calculs ACV et récupérer les résultats sous format « *.tab* » (étapes 4 et 5 de la Figure 4-25). Les paramètres pouvant être typiquement ajoutés sont :

- des fiches environnementales lorsque des matériaux sont changés (p. ex. une fenêtre en double-vitrage par une fenêtre en triple-vitrage) ;
- les consommations d’eaux chaude et froide (si des systèmes permettant des économies d’ECS sont étudiés) ;
- la surface des panneaux photovoltaïques ;
- etc.

Mettons en évidence qu’un travail en parallèle des phases 2 et 3 a été mené. En effet, pour une partie des paramètres explorés, il n’était pas possible de les « traduire » automatiquement pour les modèles via la convention de nommage, encore incomplète. Par exemple, pour étudier des fenêtres en double ou en triple-vitrage, seuls les types « *uwf* » et « *swf* » (Annexe E) étaient disponibles, mais ne permettent pas une modification interdépendante de ces deux caractéristiques. Des nouveaux types adaptés à cette nouvelle façon d’explorer certains paramètres ont ainsi été créés, sur des paramètres STD comme ACV.

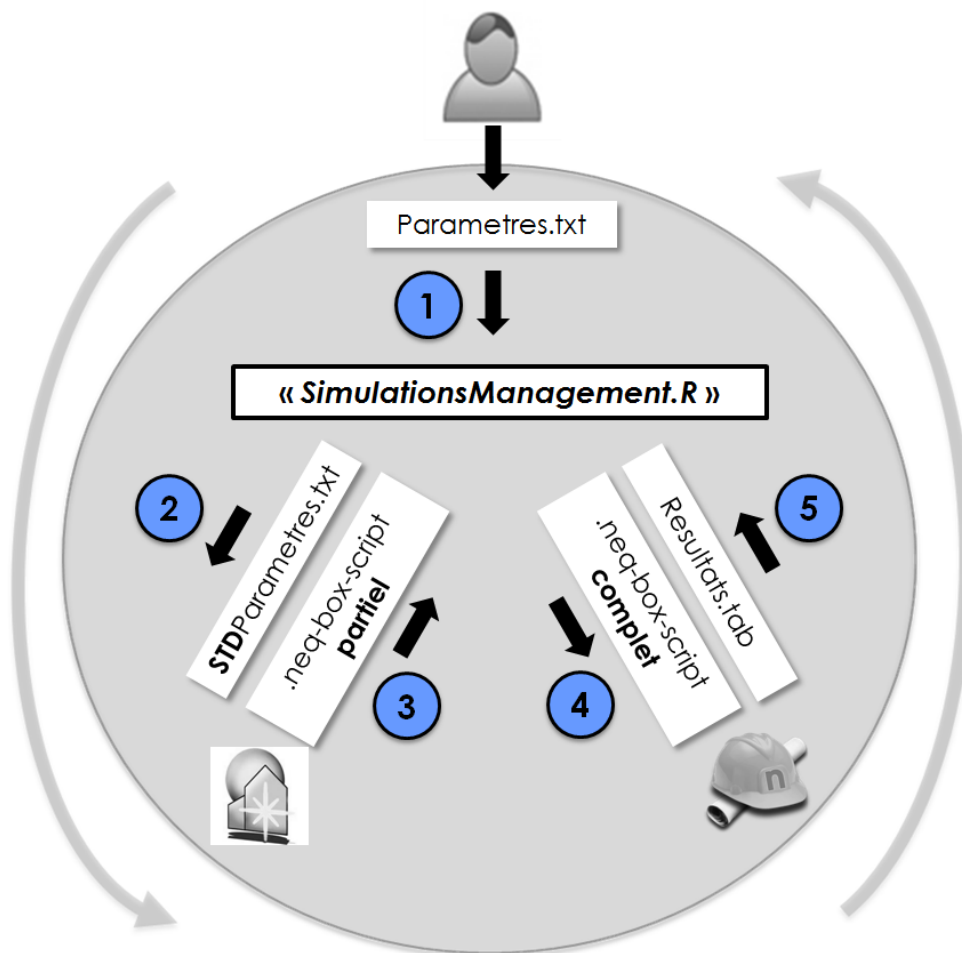


Figure 4-25. Illustration de l’interfaçage entre les BlackBox COMFIE et novaEQUER

4.4.3.2. GESTION DES ISOLANTS FUSIONNÉS

Dans ce même contexte, une autre difficulté technique concerne le fait que, pour les calculs *COMFIE*, deux isolants consécutifs dans une paroi sont fusionnés en un seul, de propriétés thermiques équivalentes. La *BlackBox* n'ayant accès qu'aux informations de *COMFIE*, seul l'isolant fusionné est visible dans la liste des matériaux dont elle dispose, avec un nom ne correspondant à aucun matériau existant dans le projet « .plp ». Le problème apparaît en considérant que la *BlackBox COMFIE* doit transmettre à la *BlackBox novaEQUER* l'ensemble des quantitatifs des matériaux du projet « .plp » (et non ceux du projet dans *COMFIE*). En effet, nous avons précédemment introduit (§ 4.2.3.2 et section 4.3.1) que la *BlackBox novaEQUER* nécessite, au préalable de son utilisation, le calcul sous *novaEQUER* d'une variante de référence du projet. Cette variante permet, entre autres, de définir les fiches environnementales associées à chaque matériau. Or, *novaEQUER* récupère les matériaux du projet « .plp », et *in fine*, ce sont ceux-là (et les fiches environnementales associées) qui sont utilisés par la *BlackBox novaEQUER*. La *BlackBox COMFIE* n'est donc pas en mesure de transmettre les quantitatifs pour les matériaux attendus par la *BlackBox novaEQUER*. La Figure 4-26 illustre le problème décrit, où x_3 vaut en réalité $x_1 + x_2$ mais cette information n'est pas connue de la *BlackBox COMFIE*.

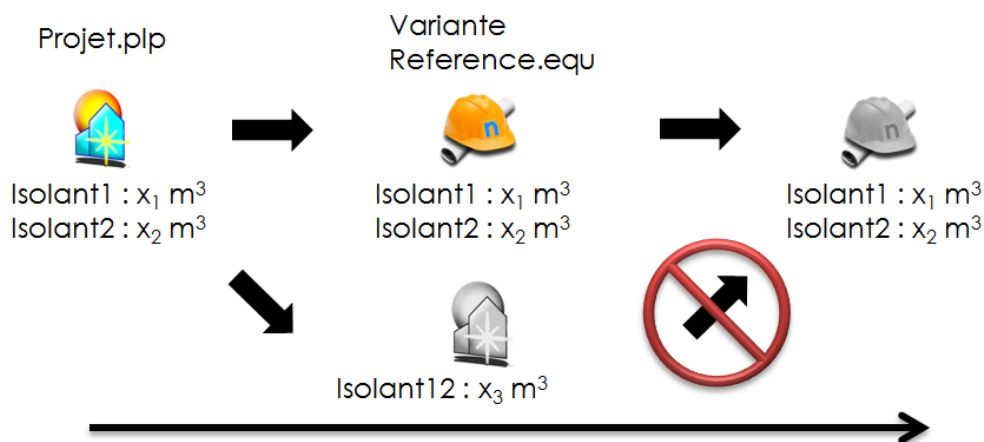


Figure 4-26. Illustration du problème engendré par la fusion des isolants dans *COMFIE* sur les calculs de la *BlackBox novaEQUER*

Ce problème ayant été rencontré sur la maison étudiée dans le chapitre 5 (un complément d'isolation en fibre de bois ajouté à de la laine de verre intégrée dans des caissons en ossature bois), nous avons développé des procédures génériques dans la branche UASA permettant de le résoudre. Pour n'entraver aucun des calculs *COMFIE*, le principe a été de travailler « en arrière-plan », et en exploitant les informations sur les isolants que nous avons conservées en mémoire vive. Le nommage de l'isolant fusionné a par ailleurs été modifié et codifié de

sorte que lorsque la *BlackBox COMFIE* réalise l'inventaire des matériaux du projet *COMFIE*, elle puisse reconnaître sans ambiguïté qu'il s'agit d'un matériau fusionné, et enclencher les procédures développées, permettant grâce aux épaisseurs sauvegardées, de retrouver à la fin du parcours de toutes les parois du projet, les quantitatifs des deux isolants de départ. Un processus de vérification a été mis en place pour s'assurer que les quantitatifs retrouvés correspondaient bien à ceux utilisés par la *BlackBox novaEQUER* via la variante de référence.

4.4.3.3. CONVERSION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE EN PUISSANCE DISSIPÉE

Ce développement mineur concerne une des hypothèses pour l'instant considéré dans l'outil *novaEQUER*. Actuellement, l'outil suppose que la consommation électrique des appareils électroménagers et de l'éclairage est égale à la chaleur dissipée à l'intérieur du logement, ce qui est une hypothèse conservatrice. Dans le cadre de ces travaux de thèse, nous avons exploité un modèle stochastique du comportement des occupants (Vorger 2014), présenté dans la partie 5.4, nous permettant de connaître, à un pas de temps de 10 minutes, les profils de consommation électrique et de puissance dissipée. Ceci nous a permis d'introduire manuellement dans le code de la *BlackBox COMFIE* un facteur de conversion moyen annuel correspondant aux scénarios d'usage considérés dans l'étude de cas du chapitre 5. Les scénarios de puissance dissipée initialement transmis par la *BlackBox COMFIE* à la *BlackBox novaEQUER* sont ainsi remplacés, après ce développement, par des scénarios de consommation électrique.

4.4.3.4. VALIDATION NUMÉRIQUE DE NOVAEQUER

Signalons pour finir qu'à l'instar de la démarche de validation numérique de la *BlackBox COMFIE*, une démarche similaire sur *novaEQUER* a été initiée, et réalisée par M.-L. Pannier. L'objectif était de vérifier les résultats de simulation suite aux développements qu'elle avait menés sur l'intégration de davantage de paramètres sur lesquels des variations paramétriques automatisées peuvent être effectuées.

4.4.4. **Travaux informatiques concernant le modèle stochastique de comportement des occupants**

Dans l'objectif de disposer de scénarios d'occupation plus réalistes que ceux conventionnels, nous avons exploité dans le chapitre 5, un modèle stochastique de comportement des occupants (Vorger 2014). Après une période de prise en

main du modèle (et l'assistance de son auteur), nous avons contextualisé la génération des scénarios produits par le modèle en fixant certaines caractéristiques socio-démographiques des ménages considérés (partie 5.4). Pour les besoins des travaux de thèse, nous avons alors réalisé deux développements mineurs en lien avec ce modèle. Le premier a consisté à produire de sorties plus détaillées concernant les apports internes. Au lieu d'un scénario hebdomadaire moyen, un scénario annuel, présentant une saisonnalité (certes légère) a été généré, et utilisé dans la modélisation de l'étude de cas du chapitre 5. Enfin, des macros *Excel* ont été développées pour automatiser partiellement les étapes conduisant de l'extraction des données brutes du modèle à leur importation automatique dans l'interface *Pléiades*.

4.4.5. *Maintien, capitalisation, et diffusion de la plateforme*

Cette dernière section du chapitre présente succinctement de plus larges aspects concernant la plateforme décrite, dont sa pérennité.

De notre travail de stage de fin d'études en 2013 à la fin de ces travaux de thèse en 2016, nous mesurons effectivement tout le chemin parcouru entre le code personnel d'un doctorant (Munaretto 2014) de ce qui s'apparente aujourd'hui à une plateforme logicielle globale pour l'évaluation des bâtiments, fortement automatisée, maintenue à jour, enrichie à intervalles réguliers (§ 4.4.5.2), et dont la documentation et l'expérience commencent à s'accumuler (§ 4.4.5.1) au point que, sous l'impulsion d'une start-up regroupant d'anciens doctorants du groupe de recherche ETB du CES, cette plateforme puisse basculer, dans un horizon relativement proche, vers un produit commercialisable (§ 4.4.5.3).

Cette évolution manifeste s'est accompagnée d'une structuration progressive des développements et peut-être davantage encore de la mise en place d'outils collaboratifs internes, en lien à la conduite de projet. Si ce déploiement n'a qu'à de rares occasions dépassé l'échelle confidentielle d'une équipe de recherche, il nous a néanmoins semblé pouvoir être intéressant de le partager, *a minima* pour le cheminement qu'il retrace.

4.4.5.1. CAPITALISATION

Dans une démarche d'amélioration continue, un premier outil, mis en place depuis plusieurs années au sein de notre équipe de recherche, a été exploité pour capitaliser les développements réalisés et les connaissances acquises. Il

s'agit d'un logiciel en ligne de gestion de projets et de collaboration (Atikteam⁶⁷). Cette plateforme collaborative a été utilisée suite au développement d'une première version fonctionnelle d'un script *R* permettant la conduite d'une analyse de sensibilité globale par le calcul des indices de Sobol. Cet outil participe depuis maintenant trois ans, à structurer de manière efficace l'expérience et les connaissances accumulées autour de la plateforme, facilitant entre autres grandement sa découverte et sa prise en main par de nouveaux membres de l'équipe (stagiaires, nouveaux doctorants...) grâce à des tutoriaux ou des pages de synthèse réalisées.

4.4.5.2. MAINTIEN

En complément de ce premier outil de l'équipe, a été instauré, à notre initiative, un autre dépôt, à portée plus opérationnelle et spécifique, c'est pourquoi il n'a pas été confondu avec celui proposé par Atikteam, regroupant des documents divers et variés, et d'ordre plus général.

La mise en place de cet outil, plus récente (mi-2015), a fait suite à la difficulté progressive rencontrée de maintenir à jour et surtout de manière uniformisée, les développements réalisés. Au début, le nombre de contributeurs était effectivement faible (2-3) et les objectifs communs, conduisant à des scripts logiquement adaptés aux besoins de ce groupe réduit de personnes. Néanmoins, au fur et à mesure de la croissance du nombre d'utilisateurs de cette plateforme, les versions initiales des scripts ont été découpées, adaptées, améliorées selon les besoins spécifiques de chacun, et une multitude de versions « parallèles » d'un même script de départ a émergé, rendant rapidement compliquée le maintien à jour de la version originelle. Pour faire face à ce problème, nous avons organisé un travail de rassemblement de l'ensemble de ces scripts existants, puis d'uniformisation permettant d'intégrer, dans une seule nouvelle version, la totalité des améliorations ayant pu être apportées. Enfin, nous avons initié des mesures visant à maintenir, sur la durée, ce développement harmonisé des scripts. Les deux mesures principales ont consisté à :

- la création d'un dépôt serveur ;
- et l'instauration d'un système de réunions à intervalles régulier.

La **création d'un dépôt serveur**, nommé « *CommonWorkSpace* », accessible à tous, a permis de centraliser les contributions, et de définir plus explicitement un espace interne commun à faire évoluer ensemble. Des fiches de suivi du développement de chaque script ont été créées. Elles prennent le format d'un modèle de document Word, rassemblant les éléments suivants :

- le nom des contributeurs dudit script ;

⁶⁷ <http://www.atikteam.com/fr/>

- une légende commune pour caractériser le nouveau développement effectué (Figure 4-27) ;
- un système commun de numérotation à trois niveaux des versions (Figure 4-28) ;
- une partie présentant les développements futurs à prioritaire mener ;
- et enfin, une description en quelques lignes du développement réalisé à chaque version.

Un archivage manuel des versions est effectué, même si l'outil de versionnage *Tortoise SVN* utilisé, permet déjà cela. Outre ces fiches de suivi, et les scripts associés, cet espace comprend également les conventions de nommage et les notices d'utilisation des *BlackBox COMFIE* et *novaEQUER* à maintenir à jour. Enfin, les comptes-rendus des réunions y sont aussi disposés. En effet, nous avons instauré un système de **réunions** à intervalles réguliers (tous les deux mois environ) pour discuter tous ensemble :

- des évolutions récentes et des mises à jour à réaliser ;
- des idées d'amélioration futures et de leur degré de priorité ;
- de la répartition du travail entre les participants d'ici la prochaine réunion.

[Fonctionnalité] : création d'une nouvelle fonctionnalité [Amélioration] : amélioration d'une fonctionnalité existante [Correction] : correction d'un bug

Figure 4-27. Légende commune mise en place pour le suivi des scripts

Numérotation des versions :

Une version sera décrite par trois numéros d'importance décroissante :

- Le premier correspondra à une **évolution majeure**. Il s'agit principalement d'une refonte ou de la création d'un nouveau script associé.
- Le second correspondra à une **évolution intermédiaire**. Par exemple, l'ajout d'une nouvelle fonctionnalité ou la correction d'une erreur relativement importante.
- Le troisième correspondra à une **évolution mineure**. Il s'agit de corrections ou améliorations mineures. Le but étant surtout de laisser une trace de la modification.

Figure 4-28. Système de numérotation commun mis en place pour le suivi des scripts

Si nous avons pu voir tous les intérêts de travailler sur des déclinaisons (branches) de la version commerciale d'outils développés par un éditeur de logiciels, il faut souligner le décalage d'horizons temporels entre un développeur et un chercheur, et l'implication principale en matière de maintien à jour de la

branche. Si un doctorant préfère effectivement travailler sur la même version pendant plusieurs mois afin d'en contrôler tous les aspects, le rôle du développeur est d'apporter rapidement aux utilisateurs de nouvelles évolutions de l'outil pour en améliorer la pratique et la pertinence. Or si l'outil évolue de façon trop rapide ou de manière trop significative, il peut devenir délicat de rapatrier le travail du doctorant dans la version pour envisager sa diffusion à terme. En contrepartie, de nouvelles fonctionnalités utiles pour le doctorant peuvent devenir disponibles. Pour ces raisons, nous avons poursuivi ce travail de mise à jour réalisé par d'anciens doctorants avant nous, et repris à présent par les suivants. Si à l'échelle de quelques mois, cet effort peut paraître superflu, l'évolution de la plateforme depuis le début de ces travaux de doctorat met en évidence que cet effort s'inscrit à plus long terme.

4.4.5.3. DIFFUSION

Comme évoqué dans l'introduction de cette section, une start-up nommée « *Kocliko* »⁶⁸, regroupant d'anciens doctorants du groupe ETB a été initiée récemment avec le projet, entre autres, d'accélérer le transfert des développements réalisés côté recherche vers des outils diffusés à des professionnels, en l'occurrence ici, l'environnement *Pléiades* de la société *IZUBA Énergies*. Les perspectives esquissées mettent en évidence la possibilité d'une symbiose intéressante :

- côté opérationnel : des outils d'aide à la conception plus avancés vont pouvoir être proposés aux professionnels du secteur. Un support complémentaire pourra ainsi être apporté lors du processus de décision, et conduisant probablement à l'introduction d'une forme de valeur ajoutée dans les études réalisées ;
- côté recherche : les bénéfices majeurs concernent un appui et des moyens informatiques accrus. Comme nous avons pu le voir, le maintien d'une telle plateforme relève en partie de la conduite de projet et du génie logiciel, ce qui peut être hors du champ de compétences du chercheur.

D'un point de vue plus technique, notons que « *Kocliko* » a déjà permis, en lien avec *IZUBA*, de lever l'un des verrous fondamentaux à l'architecture qui était en place, à savoir une perte d'informations indésirable et problématique de *Pléiades* vers *COMFIE*, limitant les possibilités de variations automatisées. Par rapport à ces travaux de thèse, cela permet de résoudre et annuler les problèmes qui avaient par exemple été rencontrés concernant le recalcul de la

⁶⁸ <http://www.kocliko.co/>

valeur des ponts thermiques (§ 4.4.2.2) et la problématique des isolants fusionnés (§ 4.4.3.2).

4.5. CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre a été consacré à présenter les moyens informatiques mis en œuvre pour appliquer, sur l'étude de cas du chapitre 5 suivant, la démarche proposée dans ces travaux de thèse. Ces moyens sont en lien étroit avec le développement d'une plateforme logicielle complète des bâtiments, associant méthodes mathématiques (optimisation multicritère, analyses de sensibilité et d'incertitudes) et modèles d'évaluation de la performance des bâtiments (*COMFIE* pour les aspects énergétiques, *novaEQUER* pour les aspects environnementaux, et un modèle économique lié au coût de construction) dans un environnement de développement informatique cohérent, orchestré par l'outil statistique *R*. Cette thèse ayant suivi et participé significativement à son évolution, un historique et des éléments de contexte ont précédé une description globale des composants-logiciels constituant cette plateforme (partie 4.2) et de l'articulation entre ces composants (partie 4.3). Fruit d'un travail résolument collectif, et ne pouvant appartenir en propre à une seule personne, la partie 4.4 a visé à mettre en évidence les apports plus personnels réalisés dans ces travaux de thèse (des précisions à ce sujet ont été apportées au travers du bref historique réalisé dans la section 4.2.2, et de la plupart des annexes associées).

En conclusion, nous avons abouti à un outil fortement automatisé intégrant un large panel de méthodes, utilisable pour nos besoins de recherche en matière d'écoconception des bâtiments, et dont la flexibilité permettra une capitalisation des futurs développements et d'envisager des coopérations avec d'autres équipes de recherche.

Chapitre 5. Étude de cas : application à la conception d'une maison individuelle

Ce chapitre, composé de quatre parties, constitue le chapitre applicatif de ces travaux de thèse. La démarche d'aide à la décision proposée a effectivement pu être testée sur une étude de cas réel, lors d'un processus de conception intégré associant chercheur et architecte, grâce à la collaboration avec un constructeur français de maisons individuelles. Après une présentation du projet (partie 5.2), les résultats des études menées au cours des différentes phases de conception seront présentés (partie 5.3). La robustesse des solutions obtenues par optimisation multicritère sera ensuite étudiée au regard de deux aspects : le changement des scénarios d'occupation et l'évolution prévue du climat jusqu'à la fin du siècle (partie 5.4). Enfin, le paramétrage de l'algorithme NSGA-II constituera le dernier volet de résultats de ce chapitre applicatif (partie 5.5).

SOMMAIRE DU CHAPITRE 5

5.1. Introduction.....	247
5.2. Présentation de l'étude de cas.....	247
5.2.1. Présentation générale.....	248
5.2.2. Description détaillée	251
5.3. Résultats d'optimisation	276
5.3.1. Phase de conception amont	277
5.3.2. Phase de conception détaillée.....	283
5.3.3. Conclusion de la partie	293
5.4. Étude de la robustesse des solutions.....	294
5.4.1. Robustesse au changement de type du ménage	294
5.4.2. Robustesse à l'évolution du climat	301
5.4.3. Conclusion sur l'étude de la robustesse.....	316
5.5. Résultats du paramétrage.....	317
5.5.1. Étude préliminaire	317
5.5.2. Paramétrage par méthode d'échantillonnage.....	327
5.5.3. Conclusion de la partie	333
5.6. Conclusion du chapitre	334

5.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre applicatif, notre participation en temps réel à un processus de conception intégré a servi à confronter à la réalité, la démarche et les moyens informatiques développés dans les chapitres précédents. Deux objectifs majeurs ont été poursuivis, à savoir :

- Évaluer le **degré de faisabilité** opérationnelle de la démarche, en particulier vis-à-vis de la valeur ajoutée en matière d'aide à la décision, et de qualité des résultats obtenus par rapport au temps d'exécution nécessaire.
- Évaluer le **degré de robustesse** de la démarche, notamment au regard de la problématique de la longue durée de vie des bâtiments et des hypothèses qui y sont associées, mais aussi d'un point de vue plus technique, vis-à-vis de la convergence et du réglage de l'algorithme d'optimisation employé.

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs études ont été menées, conduisant à une grande quantité de résultats. Les travaux de cette thèse apportant principalement une contribution d'ordre méthodologique, l'emphasis est mise sur la présentation de la démarche et seuls les résultats les plus caractéristiques sont présentés. Ce chapitre suivra le déroulement suivant :

1. Modélisation énergétique et environnementale du projet.
2. Études d'optimisation / faisabilité :
 - o études en phase de conception amont ;
 - o études en phase de conception détaillée.
3. Études de robustesse :
 - o vis-à-vis du type de ménage occupant la maison ;
 - o vis-à-vis de l'évolution prévue du climat jusqu'à la fin du siècle ;
 - o vis-à-vis du réglage de l'algorithme d'optimisation.

5.2. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE DE CAS

Un projet de construction implique un processus de décision complexe avec de multiples itérations. L'étude de cas considérée dans ces travaux correspond à un projet de construction d'une maison individuelle à énergie positive. Ce projet a quasiment démarré d'une « feuille blanche » pour évoluer jusqu'à un concept commercialisé au moment où ce manuscrit a été rédigé. De l'esquisse initiale du bâtiment au rendu final, les transformations apportées au projet ont été nombreuses et variées. Par exemple, il a été décidé de rendre la façade nord-ouest aveugle, de passer d'une maison plain-pied à une maison avec un demi-étage supplémentaire (combles aménagés avec une mezzanine), de changer l'inclinaison des deux pans de la toiture, de renforcer l'étanchéité à l'air, ou encore d'invalider le couplage d'un système de récupérateur de chaleur sous toiture avec le chauffe-eau thermodynamique prévu. Décrire le projet à chacun

de ces stades d'avancement alourdirait inutilement sa présentation, l'objectif de ce chapitre étant avant tout de mettre en application la démarche proposée, et d'illustrer l'intérêt qu'elle pourrait présenter pour les professionnels du secteur. Il en est de même avec la modélisation informatique du projet, qui a également évolué avec au fil du processus de conception. Par exemple, une modélisation multizone a remplacé la modélisation monozone des tout premiers calculs, les maisons avoisinantes initialement représentées par des parallélépipèdes rectangles ont été discrétisées plus finement après que leur influence sur les apports solaires a été identifiée comme significative, une estimation conservatrice des débits d'air parasite a été changée par une évaluation plus détaillée, et les scénarios d'occupation réglementaires ont été remplacés par des scénarios statistiques plus réalistes.

Pour ces raisons, nous avons choisi dans cette partie 5.2 de présenter le projet dans son état le plus avancé, que ce soit en matière de décisions de conception ou d'hypothèses de modélisation. Des éléments d'information sur les états antérieurs du projet seront néanmoins fournis dans les parties 5.3 et 5.4 afin de permettre leur bonne compréhension. En effet, dans ces parties, l'ensemble des études menées durant le processus de conception sont présentées, et une partie d'entre elles concerne l'état initial et les états intermédiaires du projet. Avant cette description détaillée de l'état final, une présentation générale succincte est donnée.

5.2.1. Présentation générale

Cette section vise à présenter le projet dans ses grandes lignes, sans rentrer dans les détails qui n'ont cessé d'évoluer depuis son lancement, au second semestre 2014.

L'objectif annoncé par le constructeur est d'élaborer un prototype de maison répondant aux contraintes suivantes :

- être adapté aux parcelles de surface réduite (environ 350 m²) ;
- présenter un bilan énergétique positif et des impacts environnementaux réduits ;
- intégrer des systèmes et technologies énergétiquement performants ;
- respecter la réglementation, en particulier la norme « Handicapé ».

Le projet se situe dans un futur lotissement : le domaine de Valaison, à Meung-sur-Loire, petite commune d'environ 6 000 habitants dans le département du Loiret en région Centre, proche d'Orléans (Figure 5-1). Comme illustré Figure 5-2, l'implantation de la maison est prévue dans un nouveau quartier résidentiel d'Orléans, à l'intersection entre deux rues, et à côté d'un petit parc au nord-est.

Le logement, inspiré de la Maison des Jours Meilleurs de l'architecte Jean Prouvé⁶⁹, correspond à un carré de 9 mètres par 9 mètres (Figure 5-3) avec un noyau d'installations central offrant autour près de 60 m² aménageables. L'agencement intérieur peut ainsi être modulé afin de valoriser au mieux les atouts du site. De même, à l'état initial, les façades (Figure 5-4, Figure 5-5 et Figure 5-6) ne sont pas prédéfinies et peuvent donc être ajustées selon une approche bioclimatique. La maison était initialement conçue pour être de plain-pied avec deux chambres (finalement, le projet comporte une mezzanine communiquant sur un second niveau avec une salle de bains et une chambre supplémentaires). Le plancher haut initial a quant à lui laissé place à un toit cathédrale. Le projet s'adresse prioritairement à des primo-accédants.

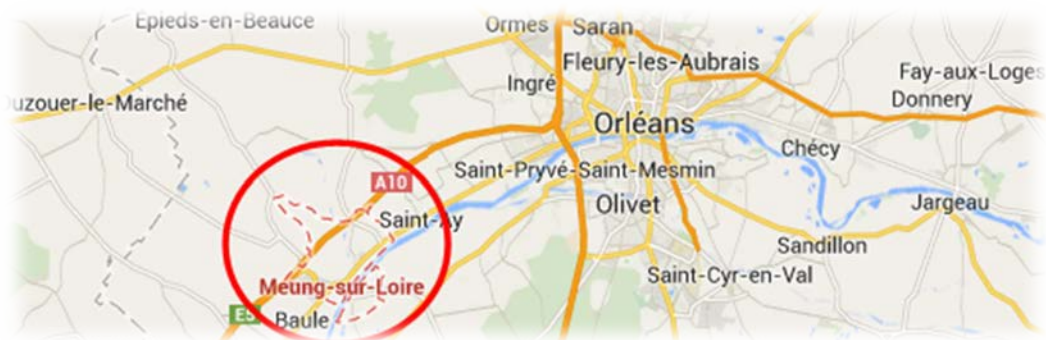


Figure 5-1. Situation géographique de Meung-Sur-Loire (45)

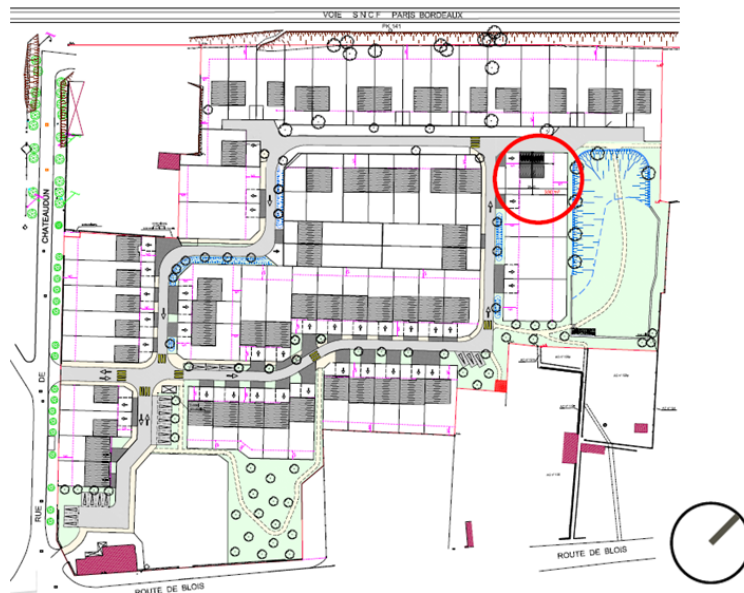


Figure 5-2. Situation du projet dans le futur lotissement

⁶⁹ <http://www.lemoniteur.fr/157-realisations/article/actualite/17729124-la-maison-des-jours-meilleurs-de-jean-prouve-recoit-ses-visiteurs>

Étude de cas : application à la conception d'une maison individuelle

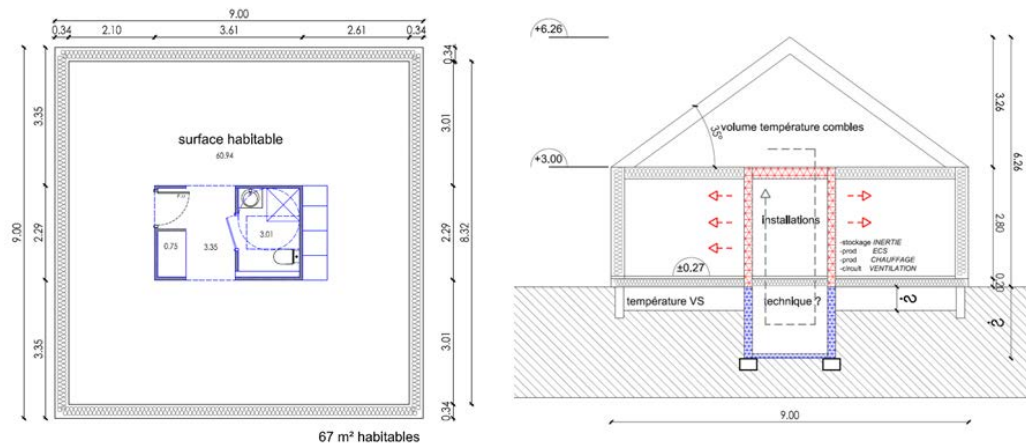


Figure 5-3. Plan (non aménagé) et coupe du projet à l'état initial

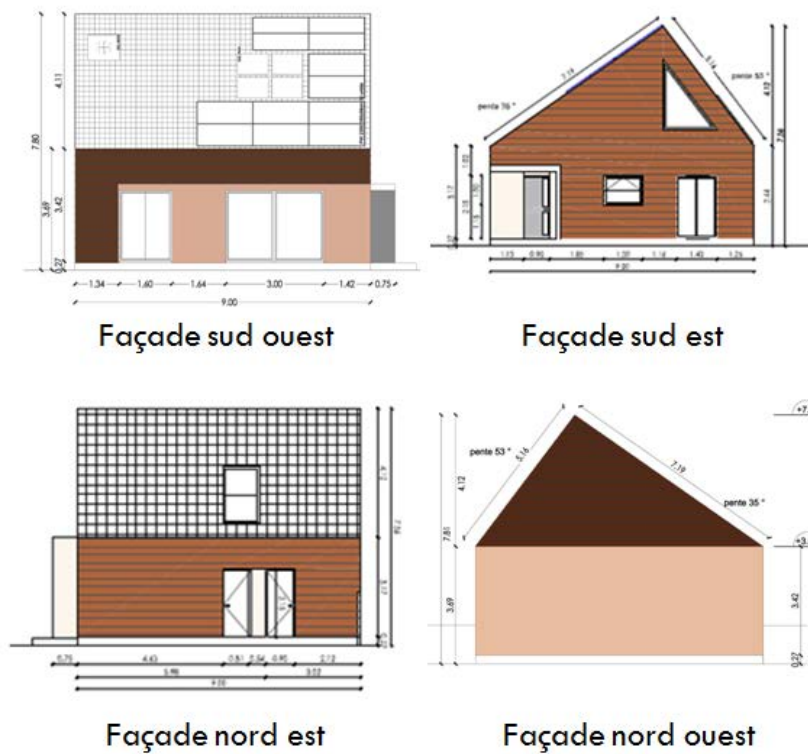


Figure 5-4. Vue des quatre façades de la maison (crédits : Fousse Constructions)



Figure 5-5. Rendu 3D de la version finale de la maison, vue Sud (crédits : Fousse Constructions)



Figure 5-6. Rendu 3D de la version finale de la maison, vue Nord (crédits : Fousse Constructions)

5.2.2. Description détaillée

Cette section vise à décrire de manière détaillée les hypothèses de modélisation considérées pour représenter l'état final du projet, sur lequel les optimisations les plus récentes ont été menées (section 5.3.2 et partie 5.4).

5.2.2.1. SITE

❖ Coordonnées GPS et altitude

Les coordonnées GPS de la maison sont :

- Latitude : 47,827 °, soit (N) 47° 49' 37''
- Longitude : 1,689 °, soit (E) 1° 41' 22''

Une altitude d'environ 100 mètres a été considérée.

❖ Données météorologiques

Les données météorologiques (température extérieure, rayonnements global et diffus horizontaux) utilisées pour les simulations proviennent de la station RT2012 la plus proche du site à savoir Trappes (zone climatique H1a), même si la station conventionnelle devrait être Nancy puisqu'Orléans se situe en zone climatique H1b (Figure 5-7).



Figure 5-7. Zones climatiques selon la RT2012, tirée de : <http://www.rt-batiment.fr/>

❖ Température du sol

La température du sol à 10 mètres de profondeur est de 14 °C (fixé par le fichier météorologique réglementaire de Trappes pour la RT2012).

❖ Albédo

Pour les façades nord-ouest et sud-ouest, donnant sur les rues, une valeur d'albédo de 0,10 a été considérée, correspondant à la réflectivité caractéristique d'une rue bitumée. Pour les façades sud-est et nord-est, une valeur de 0,20 a été choisie pour représenter la réflectivité caractéristique d'un gazon.

❖ Masques

Le site ne semble pas être impacté par des masques lointains importants (colline, montagne, etc.) mais plusieurs habitations voisines génèrent des masques solaires proches, notamment sur les façades orientées sud, ce qui a nécessité une modélisation relativement fine (Figure 5-8).

Outre les masques proches correspondant aux habitations voisines, le retrait des menuiseries a également été considéré comme un masque proche dans la modélisation du projet. Aucun débord de toiture n'existe actuellement sur le projet. Des arbres sont prévus dans le plan de masse mais n'ont pas été modélisés. En effet, leur influence sur les façades « sud » serait faible.

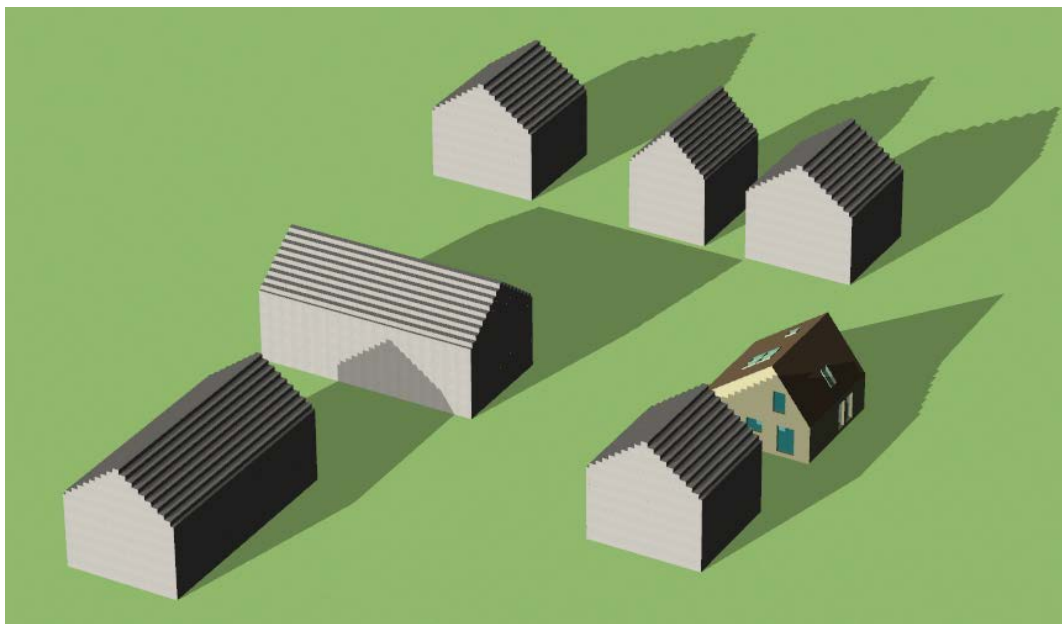


Figure 5-8. Masques proches, et modélisation associée (sous Alcyone)

5.2.2.2. ENVELOPPE

Les principales caractéristiques de l'enveloppe modélisée sont décrites ci-après :

❖ Parois opaques et menuiseries

Mur extérieur à ossature bois :

- Panneau d'OSB (12 mm, $\lambda = 0,130 \text{ W/(m.K)}$) ;
- Laine de verre (22 cm, $\lambda = 0,032 \text{ W/(m.K)}$) entre montants (45*220 mm et entraxe de 60 cm) bois ($\lambda = 0,150 \text{ W/(m.K)}$) ;
- Panneau isolant en fibre de bois (8 cm, $\lambda = 0,043 \text{ W/(m.K)}$).

Plancher sur vide-sanitaire :

- Hourdis polystyrène à languette (26 cm, $\lambda = 0,030 \text{ W/(m.K)}$) ;
- Chappe flottante béton (6 cm, $\lambda = 1,750 \text{ W/(m.K)}$).

Rampant de toiture :

- Panneau d'OSB (12 mm, $\lambda = 0,130 \text{ W/(m.K)}$) ;
- Laine de verre (30 cm, $\lambda = 0,032 \text{ W/(m.K)}$) entre montants (45*300 mm et entraxe de 60 cm) bois ($\lambda = 0,150 \text{ W/(m.K)}$).

Plancher intermédiaire :

- Panneau d'OSB (22 mm, $\lambda = 0,130 \text{ W/(m.K)}$) ;
- Interposition d'un feutre Panneau PHALTEX (10 mm, $\lambda = 0,05 \text{ W/(m.K)}$) ;
- Isolation acoustique : faux plafond suspendu sur raillage métallique en laine de verre (20 cm, $\lambda = 0,032 \text{ W/(m.K)}$) entre montants (45*200 mm et entraxe de 60 cm) bois ($\lambda = 0,150 \text{ W/(m.K)}$) ;
- Placoplatre BA13 (13 mm, $\lambda = 0,325 \text{ W/(m.K)}$).

Menuiseries extérieures :

- Fenêtres Alu 4/16/4 peu émissif en argon ($U_w = 1,50 \text{ W/(m.K)}$) et $S_w = 55 \%$;
- Coffre de volet roulant : monobloc $U_c = 1,20 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$;

Fenêtres de toit :

- « Velux MK04 » :
 - o $U_{w,vertical} = 1,10 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$;
 - o $U_{w,horizontal} = 1,40 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$;
 - o $S_w = 15 \%$;
- « Velux MK06 » :
 - o $U_{w,vertical} = 1,10 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$;
 - o $U_{w,horizontal} = 1,50 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$;
 - o $S_w = 16 \%$;
- « Velux MK08 » :
 - o $U_{w,vertical} = 1,10 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$;
 - o $U_{w,horizontal} = 1,50 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$;
 - o $S_w = 17 \%$;

Porte d'entrée en acier isolée ($U_w = 0,81 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ et $S_w = 0 \%$).

❖ **Étanchéité à l'air et débit des entrées d'air parasites**

Une étanchéité à l'air de $0,20 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ est visée. Pour estimer les débits d'air parasites (c'est-à-dire hors débit dû au renouvellement d'air déjà intégré dans la modélisation) en fonction du système de ventilation (simple ou double-flux), la norme européenne EN 13790 a été utilisée de la manière suivante.

L'objectif d'étanchéité à l'air en I4 est au préalable converti en valeur n_{50} :

$$n_{50} = \frac{I_4 \times \left(\frac{50}{4}\right)^{\frac{2}{3}}}{\left(\frac{V}{A}\right)}$$

avec V le volume chauffé (ici 301 m^3), et A la surface de parois froides hors plancher (ici 219 m^2).

En considérant un facteur f adimensionnel empiriquement calé à 15, le débit d'extraction identique à celui de l'insufflation et en sélectionnant une valeur e de

0,07 traduisant une exposition au vent moyenne, le débit des entrées d'air parasites est alors calculé de la manière suivante :

$$Q_{v,inf} = \frac{n_{50} \times V \times e}{1 + \frac{f}{e} * \left(\frac{Q_{v,insufflé} - Q_{v,extrait}}{n_{50} \times V} \right)} = 0,05 \text{ vol/h}$$

avec :

- dans le cas d'une VMC simple-flux : $Q_{v,insufflé}$ nul, et $Q_{v,extrait}$ déterminé d'après l'arrêté de 1982 sur le renouvellement d'air (§ 5.2.2.4) ;
- dans le cas d'une VMC double-flux : $Q_{v,insufflé} = Q_{v,extrait}$.

❖ Ponts thermiques

L'ensemble des ponts thermiques considérés résultent d'une étude commandée au CSTB par le constructeur. Un pont thermique surfacique a été considéré pour modéliser les agrafes fixant le panneau isolant en fibre de bois sur les montants du mur ossature bois. Une valeur de 0,008 W/(m².K) a été prise en compte dans les calculs. Plusieurs ponts thermiques de liaison ont été considérés :

- mur / vide sanitaire : 0,24 W/(m.K) ;
- refend / vide sanitaire : 0,13 W/(m.K) ;
- mur / plancher intermédiaire : 0,08 W/(m.K) ;
- mur / angle sortant : 0,04 W/(m.K) ;
- mur / charpente au niveau du pignon : 0,04 W/(m.K) ;
- mur / charpente au niveau de la façade : 0,03 W/(m.K) ;
- mur / menuiserie - Linteau de porte : 0,07 W/(m.K) ;
- mur / menuiserie - Linteau de fenêtre : 0,02 W/(m.K) ;
- mur / menuiserie - Appui fenêtre : 0,10 W/(m.K) ;
- mur / menuiserie - Tableau : 0,05 W/(m.K).

5.2.2.3. ÉQUIPEMENTS

Les équipements envisagés du projet sont :

- **Générateur** : effet Joule ;
- **Émetteurs** : panneaux rayonnants ;
- **Régulation** : thermostat certifié (CA = 0,14) ;
- **Ventilation** : mécanique contrôlée double-flux hygroréglable de type B (ATLANTIC DupoCosy HY, classe A avec une efficacité de 0,9) ;
- **Eau chaude sanitaire (ECS)** : chauffe-eau thermodynamique sur air extérieur ;
- **Ballon ECS** : capacité de 200 litres, en volume chauffé ;
- **Photovoltaïque** : système EDF ENR EnRT+ (12 panneaux PW 2350 + un onduleur SMA 5000 TL) ;
- **Autres systèmes** : récupérateur de chaleur sur eaux grises KP1 Ôbox.

Le **chauffe-eau thermodynamique** sur air extérieur (modèle ATLANTIC Odyssée 2) assure la production d'ECS. Il est composé d'un ballon de 220 litres qui est réchauffé par le condenseur d'une pompe à chaleur (PAC). La puissance moyenne absorbée par la pompe à chaleur est de 0,42 kW. Le coefficient de performance (COP) mesuré pour une chauffe de l'eau de 10 °C à 54 °C vaut en

moyenne 2,77 (d'après la fiche technique du chauffe-eau thermodynamique ATLANTIC Odyssée 2).

Le **système photovoltaïque** est constitué de 12 modules PW2350 et d'un onduleur SMA 5000TL. Un module mesurant 1,6 m², la surface du champ photovoltaïque est ainsi de 19,2 m². La puissance maximale délivrée par un module s'élève à 235 W_c avec une tension à puissance maximale de 29,8 V et un courant à puissance maximale de 7,9 A. L'onduleur permet le raccordement des modules au réseau. Sa puissance d'entrée maximale vaut 5,3 kW. La tension à l'entrée de l'onduleur ne doit pas dépasser 550 V et la tension de fonctionnement doit être comprise entre 175 V et 440 V. Les valeurs de tension et d'intensité en sortie du champ photovoltaïque doivent correspondre aux valeurs admissibles à l'entrée de l'onduleur (Tableau 5-1). Dans la modélisation considérée, l'entrée de l'onduleur a été reliée à deux strings⁷⁰ en parallèle de six modules chacun.

Tableau 5-1 : Caractéristiques du système photovoltaïque

Caractéristiques	Modules	Onduleur
Puissance maximale (kW)	3,3	5,3
Tension maximale (V)	295	550
Tension minimale de fonctionnement (V)	177	175
Tension maximale de fonctionnement (V)	240	440

Un **récupérateur de chaleur sur eaux grises** est un système qui permet la récupération des calories sur les eaux usées. Suite à une réunion entre les partenaires du projet, le gain global sur les consommations d'eau chaude sanitaire a été évalué à 15 %.

5.2.2.4. SCÉNARIOS D'USAGE

❖ Démarche générale de modélisation

Cette section détaille les scénarios d'usage utilisés pour effectuer la simulation énergétique. Partant du constat que les bâtiments performants sont beaucoup plus sensibles que leurs homologues traditionnels aux sollicitations externes (conditions météorologiques) et internes (usages), nous avons utilisé un modèle stochastique d'occupation des logements récemment développé (Vorger 2014) pour progresser vers des scénarios plus réalistes que les scénarios réglementaires. Ces scénarios statistiques ont été adaptés au contexte de l'étude de cas. Après

⁷⁰ Branchement en série de plusieurs modules pour monter une installation photovoltaïque.

une présentation du zonage thermique, nous fournirons les éléments-clés de compréhension concernant la construction des scénarios d'usage retenus.

❖ Zonage thermique

Trois zones thermiques ont été considérées pour modéliser le comportement thermique de la maison (Figure 5-9) :

- une zone « jour » ;
- une zone « nuit » ;
- et une zone « non chauffée ».

La zone « jour » comporte le séjour-cuisine, la salle de bains du rez-de-chaussée, et la mezzanine. La zone « nuit » correspond aux trois chambres, et à la salle de bains de l'étage. Enfin, la zone « non chauffée » intègre le local technique à l'étage ainsi que la gaine technique. La salle de bains de l'étage étant uniquement reliée à la chambre 3, une utilisation réduite de celle-ci est supposée hors période diurne, expliquant son inclusion dans la zone « nuit ».



Figure 5-9. Zonage thermique du projet

❖ Modèle stochastique de comportement des occupants

Un modèle stochastique d'occupation des logements (Vorger 2014) a été mis en œuvre. Calibré à l'aide de données de l'INSEE (caractéristiques socio-démographiques et enquêtes emploi du temps) et de campagnes de mesures (dont plusieurs menées par le bureau d'études *Enertech*⁷¹), le modèle permet de représenter la diversité du comportement via une approche probabiliste. À chaque simulation, un ménage différent est généré selon les propriétés du logement (maison ou appartement, nombre de pièces...). Conditionnés aux caractéristiques socio-démographiques du ménage obtenu (âge, sexe, statut d'emploi, etc.), l'équipement du logement en appareils électroménagers et les scénarios d'activités des habitants sont ensuite générés, et permettent de simuler par exemple la localisation des occupants à l'intérieur du logement ou l'utilisation des appareils électro-domestiques et de l'éclairage. À partir de quelques

⁷¹ <http://www.enertech.fr/>

centaines de simulation, il est possible d'établir des scénarios d'usages moyens issus des distributions statistiques obtenues. La Figure 5-10 illustre un profil moyen d'activités sur une semaine, et la Figure 5-11 en propose un zoom sur la journée du lundi. La Figure 5-12 illustre, quant à elle, les courbes de charge moyennes hebdomadaires pouvant être obtenues après simulation de l'utilisation des appareils électro-domestiques et de l'éclairage. Ces scénarios peuvent alors avantageusement remplacer ceux généralement fixés par des profils et des règles déterministes conventionnels. La majorité des scénarios considérés dans cette étude ont ainsi été construits à partir des profils présentés. Plus précisément, trois informations de ces profils sont extraites au pas de temps horaire pour servir de base à la construction des scénarios de l'étude de cas :

- le pourcentage de présence dans le logement, noté $p(h)$, h étant l'heure considérée ;
- le pourcentage de l'activité « sommeil » dans le logement, noté $s(h)$;
- les apports internes dans le logement, notés $AI(h)$.

De plus, certains paramètres du modèle peuvent être manuellement renseignés, ce qui permet de générer des scénarios personnalisés correspondant plus précisément au contexte de l'étude (type du logement, caractéristiques des membres du ménage, gammes de performance des équipements, etc.). Ici, nous avons renseigné plusieurs paramètres du modèle pour cadrer avec le type de clients préférentiel du constructeur partenaire, à savoir les primo-accédants. Cela a permis d'établir des usages moyens à partir de plusieurs centaines de scénarios représentatifs d'une occupation de la maison par un jeune couple d'actifs avec un enfant en bas âge. La valeur de ces paramètres est fournie dans le Tableau 5-2, et une description détaillée de ces derniers est accessible dans le chapitre 3 de la thèse de Vorger (2014). Par opposition à deux autres types de ménages qui seront étudiés dans la section 5.4.1, celui-ci sera appelé « Famille ».

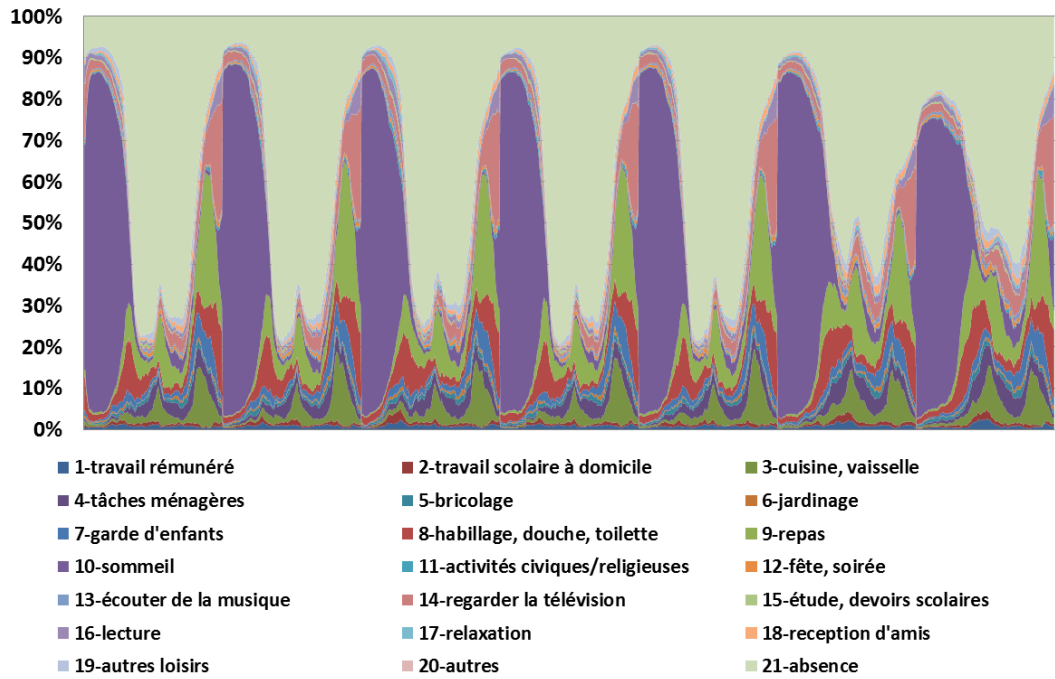


Figure 5-10. Profil moyen d'activités hebdomadaires

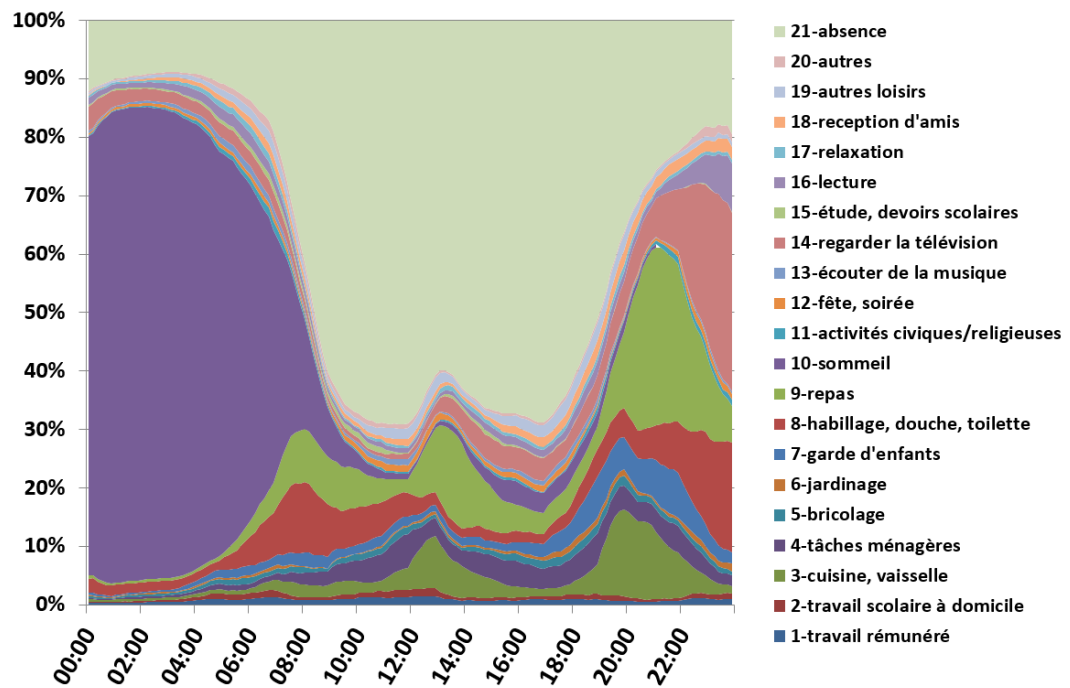


Figure 5-11. Profil moyen d'activités les lundis

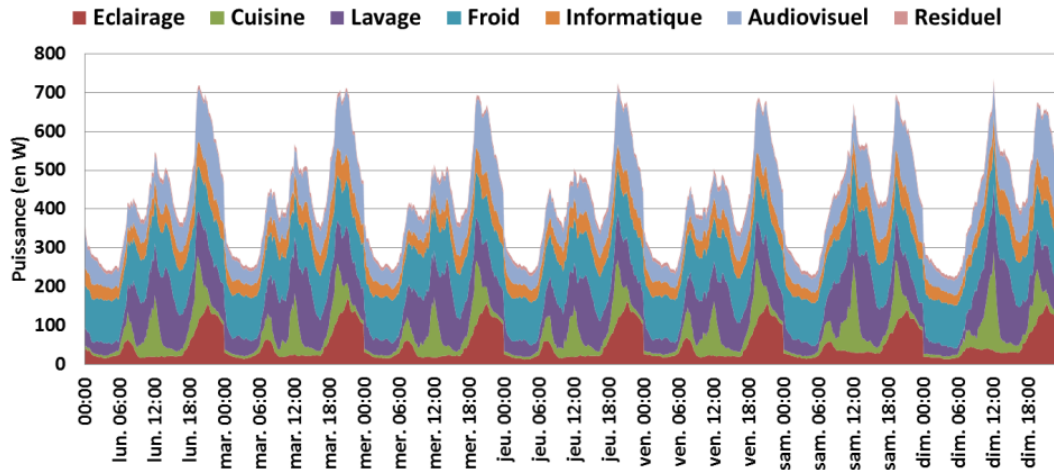


Figure 5-12. Courbes de charges hebdomadaires.

Tableau 5-2 : Principales caractéristiques socio-démographiques du ménage « Famille », au sens des variables discriminantes retenues dans le modèle stochastique d'occupation

Profil du ménage : « Famille »	
Paramètre	Valeur
<i>nbmembres</i>	3
<i>hhtype</i>	Couple + autres
<i>ownhome</i>	Propriétaire
<i>vehicle</i>	2+
<i>age</i>	30 - 30
<i>agekidx</i>	Non spécifié
<i>Sex</i>	Homme - Femme
<i>Famstat</i>	Adulte ayant un co-résident de moins de 5 ans (× 2)
<i>Empstat</i>	Temps plein - Temps plein
<i>Workhrs</i>	> 40 - > 40

Les éléments-clés sur le modèle stochastique d'occupation ayant été donnés, nous présentons dans la suite de cette section l'ensemble des scénarios considérés pour l'étude de cas.

❖ Périodes de vacances

Deux semaines de vacances sont considérées en août (du 6 au 19) et une en décembre (du 3 au 9). Pendant ces trois semaines, les scénarios d'occupation,

de puisage d'ECS, de puissance dissipée et de ventilation sont mis à zéro (c'est-à-dire que la maison est inhabitée, et tous les équipements et appareils électriques spécifiques sont coupés). Seul le scénario de chauffage maintient une consigne de température réduite à 7 °C durant ces périodes d'inoccupation.

❖ Répartition des scénarios par zone thermique

Concernant les scénarios d'occupation venant d'être introduits, le choix a été fait de générer les données à l'échelle du logement, et de les répartir ensuite dans les zones thermiques du modèle de bâtiment retenu. Aucun scénario n'a été affecté à la zone non chauffée, du fait de la fonction des volumes représentés (local et gaine techniques). Les chambres ont, quand à elles, été considérées dans un usage minimaliste, à savoir consacrées uniquement au sommeil. Les détails de ces répartitions seront précisés scénarios par scénarios.

❖ Occupation et chaleur métabolique associée

Dans la modélisation de la chaleur métabolique dégagée par les occupants, il est considéré qu'un enfant dégage la moitié de la chaleur dégagée par un adulte, la chaleur dissipée par un adulte ayant été fixée à 80 W. Pour tenir compte du ralentissement du métabolisme durant la période de sommeil, un facteur multiplicatif de 0,7 est appliqué. Concernant l'occupation, des scénarios hebdomadaires sont fournis par le modèle car celle-ci évolue peu durant l'année (p. ex. les personnes partent généralement travailler toujours à la même heure). À partir de l'activité « présence » $p(h)$ et de l'activité « sommeil » $s(h)$, le pourcentage de « présence active » $pa(h)$ peut être déduit, en soustrayant $s(h)$ à $p(h)$. Conformément avec l'usage minimaliste considéré des chambres, l'occupation de la zone « nuit » est donnée par $s(h)$, et celle de la zone « jour » par $pa(h)$. Les valeurs de ces occupations sont présentées dans la Figure 5-14 et la Figure 5-13.

Étude de cas : application à la conception d'une maison individuelle

Heure début	Heure fin	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
00:00	00:59	21%	9%	8%	9%	9%	8%	7%
01:00	01:59	12%	9%	9%	9%	10%	9%	8%
02:00	02:59	12%	9%	10%	10%	11%	10%	10%
03:00	03:59	14%	13%	12%	13%	13%	12%	11%
04:00	04:59	19%	18%	16%	18%	17%	15%	12%
05:00	05:59	27%	26%	24%	26%	24%	20%	15%
06:00	06:59	37%	36%	34%	38%	34%	26%	20%
07:00	07:59	41%	42%	39%	42%	42%	37%	30%
08:00	08:59	30%	30%	31%	31%	32%	41%	42%
09:00	09:59	23%	23%	24%	24%	24%	40%	50%
10:00	10:59	24%	25%	25%	26%	26%	41%	54%
11:00	11:59	26%	27%	29%	30%	27%	41%	52%
12:00	12:59	33%	39%	39%	38%	38%	50%	52%
13:00	13:59	36%	40%	43%	39%	41%	56%	54%
14:00	14:59	31%	34%	38%	32%	34%	51%	51%
15:00	15:59	30%	33%	34%	29%	32%	46%	44%
16:00	16:59	31%	34%	33%	28%	32%	40%	40%
17:00	17:59	35%	38%	34%	31%	36%	42%	41%
18:00	18:59	44%	46%	44%	42%	45%	47%	46%
19:00	19:59	59%	59%	61%	58%	59%	52%	56%
20:00	20:59	73%	73%	75%	70%	73%	62%	72%
21:00	21:59	81%	80%	80%	77%	78%	65%	80%
22:00	22:59	85%	82%	83%	80%	79%	66%	83%
23:00	23:59	63%	59%	61%	60%	58%	48%	75%

Figure 5-13. Scénario hebdomadaire moyen d'occupation pour la zone jour (en %), hors périodes de vacances

Heure début	Heure fin	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
00:00	00:59	69%	85%	83%	82%	81%	79%	69%
01:00	01:59	79%	86%	84%	83%	81%	79%	70%
02:00	02:59	80%	85%	83%	82%	81%	79%	70%
03:00	03:59	79%	82%	82%	81%	80%	78%	70%
04:00	04:59	73%	76%	78%	74%	75%	75%	68%
05:00	05:59	64%	66%	68%	65%	66%	69%	66%
06:00	06:59	49%	52%	52%	49%	51%	60%	60%
07:00	07:59	26%	28%	28%	24%	27%	42%	47%
08:00	08:59	7%	8%	8%	7%	7%	21%	29%
09:00	09:59	2%	3%	2%	2%	2%	9%	14%
10:00	10:59	1%	2%	1%	1%	2%	4%	6%
11:00	11:59	0%	1%	1%	1%	1%	2%	2%
12:00	12:59	1%	0%	1%	1%	0%	1%	1%
13:00	13:59	1%	1%	1%	1%	1%	2%	1%
14:00	14:59	2%	2%	1%	2%	2%	3%	3%
15:00	15:59	2%	3%	3%	3%	3%	4%	5%
16:00	16:59	2%	3%	2%	3%	3%	4%	5%
17:00	17:59	2%	2%	2%	2%	2%	2%	3%
18:00	18:59	2%	1%	2%	2%	2%	1%	2%
19:00	19:59	1%	1%	2%	1%	1%	1%	1%
20:00	20:59	1%	1%	1%	1%	0%	1%	0%
21:00	21:59	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%
22:00	22:59	2%	2%	2%	2%	2%	2%	1%
23:00	23:59	27%	27%	26%	25%	26%	21%	14%

Figure 5-14. Scénario hebdomadaire moyen d'occupation pour la zone nuit (en %), hors périodes de vacances

❖ Consignes de température

Concernant les consignes de température durant la saison de chauffage, des scénarios hebdomadaires ont également été considérés. Lorsque la maison est inoccupée (deux semaines en août et une semaine en décembre), une consigne à 7 °C est fixée. Cette consigne est valable pour les deux zones thermiques chauffées. Hors périodes de vacances, les scénarios de consigne de température sont construits selon la relation suivante :

$$\begin{cases} T_{zone\_jour}(h) = 18 + (21 - 18) \times pa(h) \\ T_{zone\_nuit}(h) = 18 + (21 - 18) \times s(h) \end{cases} \quad (5.1)$$

Comme le montre Vorger (2014) dans le chapitre 4 de sa thèse, la moyenne des températures de consigne relevées suites à différentes campagnes de mesures du cabinet *Enertech* sur 95 logements performants en France s'est effectivement avérée de 21 °C. Un réduit de 3 °C (comme pour la réglementation) a été conservé hors occupation. Les scénarios correspondant pour la zone « jour » et la zone « nuit » sont respectivement donnés dans la Figure 5-15 et la Figure 5-16.

Heure début	Heure fin	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
00:00	00:59	18,6	18,3	18,2	18,3	18,3	18,2	18,2
01:00	01:59	18,4	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
02:00	02:59	18,4	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
03:00	03:59	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,3
04:00	04:59	18,6	18,5	18,5	18,5	18,5	18,4	18,4
05:00	05:59	18,8	18,8	18,7	18,8	18,7	18,6	18,4
06:00	06:59	19,1	19,1	19,0	19,1	19,0	18,8	18,6
07:00	07:59	19,2	19,3	19,2	19,3	19,3	19,1	18,9
08:00	08:59	18,9	18,9	18,9	18,9	19,0	19,2	19,3
09:00	09:59	18,7	18,7	18,7	18,7	18,7	19,2	19,5
10:00	10:59	18,7	18,7	18,8	18,8	18,8	19,2	19,6
11:00	11:59	18,8	18,8	18,9	18,9	18,8	19,2	19,6
12:00	12:59	19,0	19,2	19,2	19,1	19,1	19,5	19,6
13:00	13:59	19,1	19,2	19,3	19,2	19,2	19,7	19,6
14:00	14:59	18,9	19,0	19,1	18,9	19,0	19,5	19,5
15:00	15:59	18,9	19,0	19,0	18,9	19,0	19,4	19,3
16:00	16:59	18,9	19,0	19,0	18,9	19,0	19,2	19,2
17:00	17:59	19,1	19,1	19,0	18,9	19,1	19,2	19,2
18:00	18:59	19,3	19,4	19,3	19,3	19,3	19,4	19,4
19:00	19:59	19,8	19,8	19,8	19,8	19,8	19,6	19,7
20:00	20:59	20,2	20,2	20,2	20,1	20,2	19,9	20,2
21:00	21:59	20,4	20,4	20,4	20,3	20,3	20,0	20,4
22:00	22:59	20,5	20,4	20,5	20,4	20,4	20,0	20,5
23:00	23:59	19,9	19,8	19,8	19,8	19,7	19,5	20,2

Figure 5-15. Consigne de température moyenne pour la zone jour (en °C), hors période de vacances

Heure début	Heure fin	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
00:00	00:59	20,1	20,6	20,5	20,5	20,4	20,4	20,1
01:00	01:59	20,4	20,6	20,5	20,5	20,4	20,4	20,1
02:00	02:59	20,4	20,6	20,5	20,5	20,4	20,4	20,1
03:00	03:59	20,4	20,5	20,5	20,4	20,4	20,3	20,1
04:00	04:59	20,2	20,3	20,3	20,2	20,2	20,3	20,0
05:00	05:59	19,9	20,0	20,0	20,0	20,0	20,1	20,0
06:00	06:59	19,5	19,6	19,6	19,5	19,5	19,8	19,8
07:00	07:59	18,8	18,9	18,8	18,7	18,8	19,3	19,4
08:00	08:59	18,2	18,3	18,2	18,2	18,2	18,6	18,9
09:00	09:59	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,3	18,4
10:00	10:59	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,1	18,2
11:00	11:59	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,1
12:00	12:59	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
13:00	13:59	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,1	18,0
14:00	14:59	18,0	18,1	18,0	18,1	18,1	18,1	18,1
15:00	15:59	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,2
16:00	16:59	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1
17:00	17:59	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1
18:00	18:59	18,1	18,0	18,1	18,1	18,0	18,0	18,1
19:00	19:59	18,0	18,0	18,1	18,0	18,0	18,0	18,0
20:00	20:59	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
21:00	21:59	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
22:00	22:59	18,1	18,0	18,0	18,1	18,1	18,1	18,0
23:00	23:59	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,6	18,4

Figure 5-16. Consigne de température moyenne pour la zone nuit (en °C), hors période de vacances

❖ Renouvellement d'air

Les arrêtés du 24 mars 1982⁷² et du 28 octobre 1983 spécifient les débits entrants et sortants à mettre en œuvre afin de renouveler suffisamment l'air des locaux (Figure 5-17). Pour l'étude de cas considérée, un débit global minimum de 90 m³/h est à extraire (cas de quatre pièces principales) dont 45 m³/h pour la cuisine. En grande vitesse, les dispositifs de ventilation doivent pouvoir extraire 120 m³/h en cuisine et 30 m³/h pour les salles de bain avec cabinet d'aisance. De plus, la réglementation thermique fixe 7 heures de renouvellement d'air à grande vitesse par semaine pour les dispositifs temporisés.

⁷² <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000862344&dateTexte=20160723>

Nombre de pièces principales du logement	Débit à extraire en petite vitesse (m³/h)		Débit à extraire en grande vitesse (m³/h)				
	Global mini	Cuisine mini	Cuisine maxi	Salle de bains ou de douches communes ou non avec cabinet d'aisance	Autres salles d'eau	Cabinet d'aisances	
						Unique	Multiple
1	35	20	75	15	15	15	15
2	60	30	90	15	15	15	15
3	75	45	105	30	15	15	15
4	90	45	120	30	15	30	15
5	105	45	135	30	15	30	15
6	120	45	135	30	15	30	15
7	135	45	135	30	15	30	15

Figure 5-17. Débits à extraire selon l'arrêté du 24 mars 1982 et du 28 octobre 1983, tirée de : http://conseils.xpair.com/consulter_savoir_faire/ventilation_qualite_air/arrete_24_mars_1982/393.htm

Au niveau du logement, le débit de renouvellement d'air nominal $\dot{V}_{nom}$ de 90 m³/h a été réparti au prorata des surfaces entre les zones « jour » et « nuit », soit respectivement 56 m³/h et 34 m³/h. Le débit additionnel d'extraction en grande vitesse $\dot{V}_{add}$, fixé à 75 m³/h en considérant la différence entre débits minimal et maximal à extraire en cuisine, a été réparti spatialement (*i.e.* dans les zones) et temporellement (*i.e.* à certaines heures de la semaine) en fonction de deux activités contribuant principalement à la production d'humidité dans le logement : l'activité 3 « cuisine/vaisselle », notée $A_3(h)$, et l'activité 8 « douche/toilette/habillage », notée $A_8(h)$. La première a été associée à la zone « jour » et la seconde à la zone « nuit », ce qui permet ainsi de définir le débit global de renouvellement d'air pour chacune de ces zones, selon la relation (5.2) :

$$\begin{cases} \dot{V}_{zone\_jour}(h) = \dot{V}_{nom} + A_3(h) \times k_v \\ \dot{V}_{zone\_nuit}(h) = \dot{V}_{nom} + A_8(h) \times k_v \end{cases} \quad (5.2)$$

avec : k_v le rapport entre le débit additionnel cumulé sur une semaine et la somme des « points d'activité » des activités 3 et 8 durant cette semaine :

$$k_v = \frac{\dot{V}_{add} \times 7}{\sum_{h=1}^{h=168} (A_3(h) + A_8(h))} \quad (5.3)$$

Un réduit moyen de 30 % a par ailleurs été supposé pour intégrer le fait que, en période d'inoccupation, la ventilation peut être soit coupée, soit à une vitesse plus basse que la vitesse nominale. La Figure 5-18 et Figure 5-19 présentent les scénarios obtenus, respectivement pour la zone « jour » et la zone « nuit ».

Étude de cas : application à la conception d'une maison individuelle

Heure début	Heure fin	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
00:00	00:59	39	39	39	39	39	39	39
01:00	01:59	39	39	39	39	39	39	39
02:00	02:59	39	39	39	39	39	39	39
03:00	03:59	39	39	40	39	39	39	39
04:00	04:59	40	40	40	39	40	40	39
05:00	05:59	40	40	40	39	40	40	39
06:00	06:59	40	40	40	40	40	40	40
07:00	07:59	40	41	41	40	41	40	40
08:00	08:59	40	41	40	40	40	41	41
09:00	09:59	40	40	40	40	40	41	41
10:00	10:59	40	40	40	40	40	40	41
11:00	11:59	40	41	40	41	41	42	42
12:00	12:59	44	44	44	45	45	45	46
13:00	13:59	43	42	43	43	42	44	45
14:00	14:59	42	41	42	41	41	42	42
15:00	15:59	41	41	40	40	40	41	41
16:00	16:59	40	40	40	40	40	41	40
17:00	17:59	40	40	40	40	40	40	40
18:00	18:59	41	42	41	41	42	41	41
19:00	19:59	46	46	46	45	46	45	45
20:00	20:59	46	47	47	46	47	46	47
21:00	21:59	44	44	44	43	44	43	44
22:00	22:59	41	41	42	41	41	41	41
23:00	23:59	40	40	40	40	40	40	40

Figure 5-18. Scénario hebdomadaire moyen de ventilation pour la zone jour (en m^3/h), hors périodes de vacances

Heure début	Heure fin	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
00:00	00:59	26	24	25	25	25	25	25
01:00	01:59	25	24	25	25	25	25	25
02:00	02:59	25	24	25	25	24	25	25
03:00	03:59	24	24	24	25	24	24	25
04:00	04:59	24	24	24	25	25	24	25
05:00	05:59	25	25	26	26	26	25	25
06:00	06:59	28	28	28	28	28	26	26
07:00	07:59	29	30	29	29	30	29	28
08:00	08:59	28	27	28	28	28	29	29
09:00	09:59	26	27	27	26	27	28	29
10:00	10:59	27	27	27	26	27	28	30
11:00	11:59	26	26	26	26	26	27	28
12:00	12:59	25	25	25	25	25	26	26
13:00	13:59	25	25	25	25	25	25	25
14:00	14:59	24	25	25	25	25	25	25
15:00	15:59	25	25	25	25	25	25	25
16:00	16:59	25	25	25	24	24	25	25
17:00	17:59	25	25	25	24	25	25	25
18:00	18:59	26	25	25	25	25	25	25
19:00	19:59	26	26	26	26	26	26	26
20:00	20:59	27	27	27	27	27	26	26
21:00	21:59	29	28	29	30	28	27	29
22:00	22:59	31	30	31	31	30	28	31
23:00	23:59	31	29	31	30	30	29	30

Figure 5-19. Scénario hebdomadaire moyen de ventilation pour la zone nuit (en m^3/h), hors périodes de vacances

❖ Puissance dissipée

Pour les scénarios moyens de puissance dissipée par l'éclairage et l'électroménager, le choix a été fait de générer les données à l'échelle du logement, et de les répartir ensuite dans les zones thermiques du modèle de bâtiment. À partir des profils de consommation électrique des appareils, un ensemble d'hypothèses est considéré dans le modèle stochastique d'occupation pour définir la fraction de l'électricité consommée qui sera dégagée sous forme de chaleur à l'intérieur du logement. Par exemple, elle est de 60 % pour les lave-vaisselles, les 40 % restant étant évacués avec les eaux grises. L'ensemble de ces hypothèses est accessible dans le chapitre 5 de la thèse de Vorger (2014). De par l'usage minimaliste considéré des chambres, la répartition a forfaitairement été réalisée comme suit : 90 % pour la zone « jour », et 10 % pour la zone « nuit ». Des profils annuels moyens ont été utilisés, pour tenir compte de l'existence d'une saisonnalité, bien qu'elle soit modérée. La Figure 5-20 présente les profils annuels obtenus.

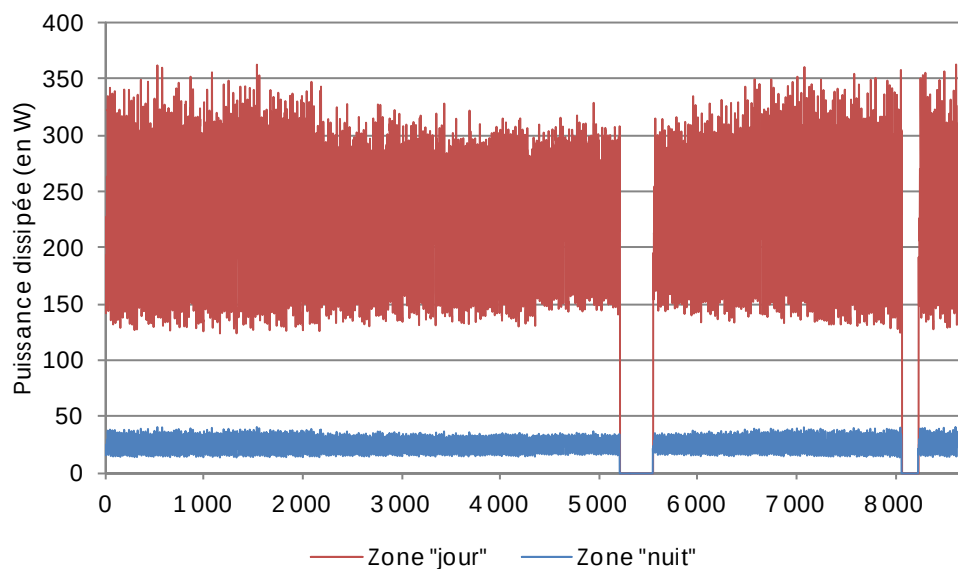


Figure 5-20. Profil annuel moyen de puissance dissipée par les appareils électriques

❖ Puisage d'eau chaude sanitaire

Le profil de puisage en eau chaude sanitaire est présenté à la Figure 5-21, et est exprimé en litres d'eau à 40 °C. Ce profil moyen a été généré à partir de moyennes françaises fournies par le Centre d'Information sur l'Eau (CIE) sur un panel de 959 foyers représentatifs de la population française. Le profil journalier de puisage pour 100 familles tirées de manière aléatoire est ainsi généré, permettant d'obtenir une journée moyenne de puisage d'ECS, répétée sur l'ensemble de la semaine.

I	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
1 H	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
2 H	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
3 H	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
4 H	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
5 H	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21	2.21
6 H	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51
7 H	15.43	15.43	15.43	15.43	15.43	15.43	15.43
8 H	17.80	17.80	17.80	17.80	17.80	17.80	17.80
9 H	13.16	13.16	13.16	13.16	13.16	13.16	13.16
10 H	11.46	11.46	11.46	11.46	11.46	11.46	11.46
11 H	9.51	9.51	9.51	9.51	9.51	9.51	9.51
12 H	8.29	8.29	8.29	8.29	8.29	8.29	8.29
13 H	5.55	5.55	5.55	5.55	5.55	5.55	5.55
14 H	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07	4.07
15 H	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03
16 H	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96
17 H	2.99	2.99	2.99	2.99	2.99	2.99	2.99
18 H	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20
19 H	7.27	7.27	7.27	7.27	7.27	7.27	7.27
20 H	7.76	7.76	7.76	7.76	7.76	7.76	7.76
21 H	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95	7.95
22 H	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46	9.46
23 H	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71
24 H							

Figure 5-21. Scénario hebdomadaire moyen de puisage en eau chaude sanitaire (en litres), hors périodes de vacances

Les scénarios présentés ci-après ont été définis « manuellement », et ne sont pas issus du modèle stochastique d'occupation précédemment utilisé.

❖ **Surventilation nocturne**

Une stratégie de surventilation nocturne a été modélisée entre 19 h et 7 h. Une ouverture des fenêtres est simulée lorsque la température extérieure est inférieure à celle de l'intérieur de la maison plus un degré Celsius. La fermeture des fenêtres intervient si la température extérieure devient supérieure à celle de l'intérieur de la maison plus un degré Celsius ou si la température intérieure de la maison passe en-dessous de 24 °C. Le renouvellement d'air naturel d'air a été représenté par un débit de ventilation équivalent de 5 vol/h appliqué aux zones chauffées (Figure 5-22).

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	100	100	100	100	100	100	100
1 H	100	100	100	100	100	100	100
2 H	100	100	100	100	100	100	100
3 H	100	100	100	100	100	100	100
4 H	100	100	100	100	100	100	100
5 H	100	100	100	100	100	100	100
6 H	100	100	100	100	100	100	100
7 H	100	100	100	100	100	100	100
8 H	0	0	0	0	0	0	0
9 H	0	0	0	0	0	0	0
10 H	0	0	0	0	0	0	0
11 H	0	0	0	0	0	0	0
12 H	0	0	0	0	0	0	0
13 H	0	0	0	0	0	0	0
14 H	0	0	0	0	0	0	0
15 H	0	0	0	0	0	0	0
16 H	0	0	0	0	0	0	0
17 H	0	0	0	0	0	0	0
18 H	0	0	0	0	0	0	0
19 H	100	100	100	100	100	100	100
20 H	100	100	100	100	100	100	100
21 H	100	100	100	100	100	100	100
22 H	100	100	100	100	100	100	100
23 H	100	100	100	100	100	100	100
24 H	100	100	100	100	100	100	100

Figure 5-22. Scénario de surventilation nocturne pour les zones jour et nuit (en %)

❖ Occultation hivernale

Une fermeture des volets la nuit entre 22 h et 7 h a été considérée. Ce scénario d'occultation à 100 % des ouvrants s'applique toute l'année, avec une résistance thermique additionnelle prise à 0,15 m².K/W (Figure 5-23).

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	100	100	100	100	100	100	100
1 H	100	100	100	100	100	100	100
2 H	100	100	100	100	100	100	100
3 H	100	100	100	100	100	100	100
4 H	100	100	100	100	100	100	100
5 H	100	100	100	100	100	100	100
6 H	100	100	100	100	100	100	100
7 H	100	100	100	100	100	100	100
8 H	0	0	0	0	0	0	0
9 H	0	0	0	0	0	0	0
10 H	0	0	0	0	0	0	0
11 H	0	0	0	0	0	0	0
12 H	0	0	0	0	0	0	0
13 H	0	0	0	0	0	0	0
14 H	0	0	0	0	0	0	0
15 H	0	0	0	0	0	0	0
16 H	0	0	0	0	0	0	0
17 H	0	0	0	0	0	0	0
18 H	0	0	0	0	0	0	0
19 H	0	0	0	0	0	0	0
20 H	0	0	0	0	0	0	0
21 H	0	0	0	0	0	0	0
22 H	100	100	100	100	100	100	100
23 H	100	100	100	100	100	100	100
24 H	100	100	100	100	100	100	100

Figure 5-23. Scénario hebdomadaire d'occultation hivernale pour toutes les zones (en %)

❖ Occultation estivale

Un scénario d'occultation dite estivale des ouvrants a été considéré du 21 mai au 23 septembre, avec un pourcentage d'occultation variable suivant l'orientation de l'ouverture. Pour les façades nord-est et sud-est, le pourcentage d'occultation est de 100 % le matin et de 70 % l'après-midi (Figure 5-24). Pour les façades nord-ouest et sud-ouest, un scénario inverse est considéré (Figure 5-25). L'occultation nocturne entre 22 h et 7 h est conservée, tout comme la résistance thermique additionnelle, fixée à 0,15 m².K/W.

Étude de cas : application à la conception d'une maison individuelle

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	100	100	100	100	100	100	100
1 H	100	100	100	100	100	100	100
2 H	100	100	100	100	100	100	100
3 H	100	100	100	100	100	100	100
4 H	100	100	100	100	100	100	100
5 H	100	100	100	100	100	100	100
6 H	100	100	100	100	100	100	100
7 H	100	100	100	100	100	100	100
8 H	0	0	0	0	0	0	0
9 H	100	100	100	100	100	100	100
10 H	100	100	100	100	100	100	100
11 H	100	100	100	100	100	100	100
12 H	100	100	100	100	100	100	100
13 H	100	100	100	100	100	100	100
14 H	70	70	70	70	70	70	70
15 H	70	70	70	70	70	70	70
16 H	70	70	70	70	70	70	70
17 H	70	70	70	70	70	70	70
18 H	0	0	0	0	0	0	0
19 H	0	0	0	0	0	0	0
20 H	0	0	0	0	0	0	0
21 H	0	0	0	0	0	0	0
22 H	100	100	100	100	100	100	100
23 H	100	100	100	100	100	100	100
24 H							

Figure 5-24. Scénario d'occultation estivale pour les façades nord-est et sud-est (en %)

%	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
0 H	100	100	100	100	100	100	100
1 H	100	100	100	100	100	100	100
2 H	100	100	100	100	100	100	100
3 H	100	100	100	100	100	100	100
4 H	100	100	100	100	100	100	100
5 H	100	100	100	100	100	100	100
6 H	100	100	100	100	100	100	100
7 H	100	100	100	100	100	100	100
8 H	0	0	0	0	0	0	0
9 H	70	70	70	70	70	70	70
10 H	70	70	70	70	70	70	70
11 H	70	70	70	70	70	70	70
12 H	70	70	70	70	70	70	70
13 H	100	100	100	100	100	100	100
14 H	100	100	100	100	100	100	100
15 H	100	100	100	100	100	100	100
16 H	100	100	100	100	100	100	100
17 H	100	100	100	100	100	100	100
18 H	0	0	0	0	0	0	0
19 H	0	0	0	0	0	0	0
20 H	0	0	0	0	0	0	0
21 H	0	0	0	0	0	0	0
22 H	100	100	100	100	100	100	100
23 H	100	100	100	100	100	100	100
24 H							

Figure 5-25. Scénario d'occultation estivale pour les façades nord-ouest et sud-ouest (en %)

5.2.2.5. HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION ENVIRONNEMENTALE

Si les objectifs et le système étudié ont été définis, au sens de l'ACV, dans la partie 1.4, nous précisons ici le périmètre du système, et les principales autres hypothèses de modélisation environnementale (choix de la base de données et des fiches environnementales associées aux éléments du bâtiment, choix du mix énergétique, consommations d'eau, quantité de déchets de chantier).

❖ Périmètre du système

Sont considérés, à chaque étape du cycle de vie de la maison, l'extraction, la préparation, le transport des matières premières et l'énergie requise pour toutes ces étapes. Nous retenons les éléments suivants :

- étape de construction :
 - o la production des composants de la maison : matériaux (incluant un taux de chute), et équipements.
- étape d'utilisation :
 - o la consommation énergétique de la maison pour le chauffage, la ventilation, la production d'ECS, d'eau froide, et la consommation d'électricité des différents auxiliaires et équipements électroménagers... ;
 - o la production d'électricité renouvelable sur site avec les panneaux photovoltaïques ;
- étape de rénovation :
 - o le remplacement à l'identique des composants de la maison lors de leur fin de vie.
- étape de démolition :
 - o le traitement en fin de vie des composants du bâtiment.

Concernant le traitement des matériaux en fin de vie, le bois est considéré certifié et incinéré avec valorisation énergétique. L'acier, l'aluminium et le cuivre sont recyclés, et les autres déchets mis en installation de stockage de déchets inertes (ISDI). Concernant les distances aux différents sites de traitement, les valeurs par défaut proposées dans le logiciel *novaEQUER* ont pour l'instant été conservées (Tableau 3-4).

Tableau 5-3 : Distances considérées pour le traitement des déchets

Destination	Distance
Décharge pour déchets inertes (IDSI)	20 km
Incinérateur	10 km
Centre de recyclage	100 km
Site de production vers chantier	100 km

❖ Base de données environnementales

La base de données suisse *ecoinvent*⁷³ qui répertorie des données d'ACV pour des produits ou procédés dans de nombreux domaines⁷⁴ a été utilisée, dans sa version 2.2. Concernant la durée de vie des menuiseries et des revêtements, des valeurs moyennes issues de la base de données INIES⁷⁵ ont été considérées (Tableau 5-4).

Tableau 5-4 : Durées de vies pour les menuiseries et les revêtements

Durée de vie (ans)	
Porte intérieure	Bois reconstitué ou, massif
	30
Porte extérieure	Acier
	50
Fenêtre	Aluminium
	30
Revêtement	Peinture
	10
	Carrelage
	30

Pour les autres éléments (excepté les équipements et mention contraire dans le Tableau 5-6), la durée de vie est considérée égale à celle du bâtiment.

❖ Fiches environnementales

Ci-après sont présentées les fiches environnementales de fabrication et d'élimination associées, sous *novaEQUER*, à chaque élément considéré du projet, avec la durée de vie de l'élément. Les fiches présentées proviennent de la base de données *ecoinvent* v2.2. Les éléments du projet pris en compte peuvent en pratique être rangés en deux catégories : ceux automatiquement récupérés par *novaEQUER* à partir du modèle de bâtiment sous *Pléiades+COMFIE* (Tableau 5-5), et ceux devant être ajoutés manuellement (Tableau 5-6). Des éléments non pertinents en STD, et ainsi non modélisés, peuvent effectivement l'être en ACV (p.

⁷³ <http://www.esu-services.ch/fr/banque-de-donnees/ecoinvent/>

⁷⁴ http://docs.izuba.fr/fr/index.php/Base_de_donn%C3%A9es_ACV

⁷⁵ <http://www.base-inies.fr/inies/Consultation.aspx>

ex. une charpente située dans des combles non chauffés). De plus, dans le développement informatique réalisé (chapitre 4), la version de l'extension de *novaEQUER* utilisée ne permet pas encore une récupération automatisée des équipements (contrairement à la version commerciale). Pour ces éléments, les quantitatifs sont à renseigner, ce qui peut être parfois délicat (p. ex. cuivre présent dans le récupérateur de chaleur sur eaux grises). Dans ces cas de figure, des approximations ont été réalisées.

Tableau 5-5 : Fiches environnementales pour les éléments automatiquement liés entre COMFIE et novaEQUER

Type d'élément	Fiches associées		Durée de vie
	Fabrication	Élimination	
Ardoise	Fibre ciment – tuile	Déchet inerte – kg - décharge	75 ans
Béton Lourd	Béton B25	Déchet inerte – kg - décharge	Celle du bâtiment
PolystyreneHourdis	Polystyrène expansé	Déchet inerte – kg - décharge	Celle du bâtiment
Placoplâtre	Plâtre - plaque	Déchet inerte – kg - décharge	Celle du bâtiment
Revêtement de sol	Carrelage	Déchet inerte – kg - décharge	30 ans
Revêtement des murs et plafonds	Peinture eau m ²	_default-m2-décharge	10 ans
Porte bois intérieure	Porte bois intérieure	Porte bois intérieure - m2- incinération	30 ans
Fenêtre Aluminium double vitrage	Aluminium double vitrage	Aluminium double vitrage – m2- recyclage (Même fiche pour l'impact évité)	30 ans

Tableau 5-6 : Fiches environnementales pour les éléments ajoutés manuellement

Type d'élément	Fiches associés		Quantité	Durée de vie
	Fabrication	Élimination	Quantité	
Fondations	Béton pour fondation	Déchet inerte – kg - décharge	50 tonnes	Celle du bâtiment
PV	Système solaire PV posé (en m ²)	_default-m2-decharge	19,20 m ²	30 ans
Ballon de stockage ECS	Ballon de stockage ECS	Ballon de stockage ECS	220 L	20 ans
Système de ventilation double flux	Système de ventilation décentralisé 6x120m3/h conduits acier – sans échangeur air-sol ⁷⁶	Acier – recyclage	0,17	20 ans
Récupérateur de chaleur sur eaux grises	Cuivre	– Cuivre – kg - recyclage	6 kg	50 ans
Convecteur électrique⁷⁷	Aluminium	Aluminium - recyclage	27 kg	15 ans
	Acier faiblement allié	Acier – kg - recyclage	6 kg	15 ans

❖ **Énergie et eau**

Concernant le mix énergétique de production électrique, permettant d'évaluer les pollutions associées à la consommation électrique de la maison, deux approches ont été utilisées : un mix dynamique par usage (Herfray 2011) et un mix dynamique global (Peuportier et Herfray 2012). Le mix dynamique par usage a été calibré à partir de données issues de RTE pour l'année 2009⁷⁸, et permet, contrairement à un mix moyen annuel, d'intégrer l'effet saisonnier d'un

⁷⁶ Cette fiche correspond à un système de ventilation double-flux pour un bâtiment composé de 6 logements. Pour un logement ayant une ventilation double-flux, on la divise ainsi par 6.

⁷⁷ Convecteur électrique de 3 000 W composé de 50 % d'aluminium et 10 % d'acier, d'après la base de données PEP Ecopassport : <http://www.pep-ecopassport.org/fr/consulter-les-pep/>

⁷⁸ Documentation IZUBA énergie : http://docs.izuba.fr/fr/index.php/Batiment/_Energie

usage de masse (comme par exemple le chauffage). Les pointes d'hiver, fortement émettrices de GES (car des centrales à charbon ou au fioul sont sollicitées), peuvent ainsi être prises en compte. Le mix dynamique global fournit, quant à lui, une répartition horaire des sources de production d'électricité, non dissociée par usage.

Pour la consommation d'eau des habitants, les prélèvements d'ECS ont été renseignés en cohérence avec le scénario de puisage précédemment présenté. Pour les prélèvements d'eau froide les données moyennes françaises ont été utilisées, à savoir 100 L/jour. Les économies d'énergie pouvant être réalisées grâce au chauffe-eau thermodynamique et le récupérateur de chaleur sur eaux grises ont été pris en compte dans les calculs ACV.

❖ Déchets de chantier

Les déchets inhérents à un chantier de construction sont dans le logiciel *novaEQUER* pris en compte via un taux de chute, fixé dans ces travaux à 5 %.

5.3. RÉSULTATS D'OPTIMISATION

Cette partie a pour objectif d'illustrer la mise en œuvre de la démarche proposée, à différents stades du processus de conception. Comme annoncé en introduction de ce chapitre, et rappelé dans la partie précédente, plusieurs études ont été menées sur l'étude de cas considérée, selon l'avancement du projet mais aussi celui du développement informatique de la plateforme de simulation. Ces études qui ont en partie jalonné le processus de conception, sont intervenues, soit dans une phase de conception amont (également appelée phase esquisse), soit dans une phase de conception plus détaillée. Un récapitulatif est proposé dans le Tableau 5-7, afin de faciliter leur appropriation par le lecteur. De manière générale, les études en phase esquisse ont plutôt porté sur des aspects architecturaux, avec des moyens informatiques encore limités à ce moment-là, et celles en phase détaillée sur des aspects plus techniques, avec davantage de possibilités dans l'optimisation menée. La présentation de cette partie suivra l'ordre chronologique de ces études, en mettant l'accent sur l'illustration de la démarche, et non sur l'exhaustivité des résultats.

Tableau 5-7 : Récapitulatif des études d'optimisation menées durant le processus de conception de la maison Fousse Constructions

Stade de conception	Méthode employée	Variables de conception	Critères d'intérêt
Amont	STD	-	Diagnostic initial (flux énergétiques, confort...)
Amont	Variations paramétriques	Forme géométrique + surfaces vitrée	Besoins de chauffage
Amont	Plan factoriel complet	Agencement intérieur + surfaces vitrée	Besoins de chauffage / Coût de construction des façades
Détaillé	Algorithme NSGA-II	Enveloppe (8) + équipements (3)	Bilan énergétique / Coût de construction du projet
Détaillé	Algorithme NSGA-II	Enveloppe (8) + équipements (3)	Émissions de GES / Coût de construction du projet

5.3.1. Phase de conception amont

Les études en phase de conception amont ont débuté sur la base d'une première esquisse de l'architecte. Après un diagnostic initial, des variations paramétriques simples ont tout d'abord été menées afin de dégager des grandes tendances permettant, dans un second temps, d'orienter des explorations par plan factoriel complet.

5.3.1.1. PREMIÈRES SIMULATIONS EN MONOZONE

Avant de se lancer dans des études d'optimisation, il est utile de réaliser un diagnostic de départ, permettant d'identifier les forces et les faiblesses du projet, et surtout les potentiels leviers d'action pour améliorer sa performance. Dans cette optique, une première simulation thermique dynamique a été effectuée avec un modèle monozone, des scénarios réglementaires, des masques proches définis de manière simplifiée, aucun traitement du confort d'été, etc. À ce stade, une VMC simple-flux était prévue.

Cela a permis d'observer des surchauffes importantes (Figure 5-26) sur toute l'étendue de la période estivale (taux d'inconfort⁷⁹ supérieur à 20 %), et de définir le scénario d'occultation des ouvrants et la stratégie de surventilation nocturne présentés dans le § 5.2.2.4. Suite à leur mise en place, le taux d'inconfort a été réduit à moins de 2 %.

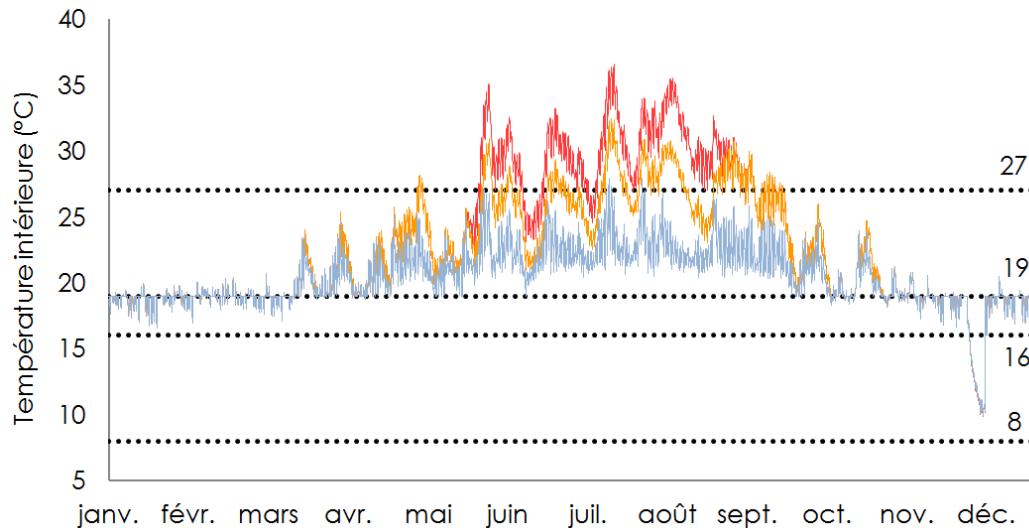


Figure 5-26. Profil annuel de la température intérieure (référence : en rouge ; gestion des occultations : en orange ; gestion des occultations et mise en place d'une surventilation nocturne : en bleu)

Avec les flux énergétiques mis en évidence dans la Figure 5-27, les ordres de grandeur principaux du bilan thermique du projet ont alors pu être établis : au niveau des gains bruts, les apports solaires et la puissance dissipée représentent chacun à peu près 40 %, les 20 % restants correspondant au dégagement de chaleur métabolique. Près de 60 % des gains bruts sont valorisés en gains utiles, compensant environ 60 % des besoins bruts du bâtiment. Suite à ce premier diagnostic, l'objectif a été de travailler sur la forme architecturale et l'orientation des pièces à l'intérieur de la maison pour améliorer le bilan thermique.

⁷⁹ Pour mémoire, cet indicateur défini dans le chapitre 1 correspond au nombre d'heures occupées du logement où la température intérieure est hors de la plage de température suivante : [16; 27] °C

Besoins bruts : 5 030 kWh	
—	Chaleur métabolique : 970 kWh
Gains utiles : 2 910 kWh	Gains des appareils : 1 770 kWh
=	Gains solaires : 2 010 kWh
Besoins nets : 2 120 kWh	

Figure 5-27. Flux énergétiques à l'état initial du projet

5.3.1.2. VARIATIONS PARAMÉTRIQUES SIMPLES

En accord avec l'architecte en charge du projet, trois aspects ont été étudiés dans cette étude en phase amont de conception :

- la forme géométrique de la maison ;
- l'orientation des pièces ;
- le pourcentage de surface vitrée par façade.

Plus précisément, quatre formes géométriques rectangulaires, plus ou moins allongées, ont été envisagées en alternative à la forme carrée initiale. Deux suivaient l'axe nord-est / sud-ouest, et les deux autres l'axe nord-ouest / sud-est. Trois configurations de l'agencement des pièces à l'intérieur de la maison ont été considérées (Figure 5-28), la quatrième (chambres côté sud-ouest) ayant été écartée pour des contraintes architecturales (pas d'accès au séjour depuis la rue où se trouvait le parking au moment de cette étude).

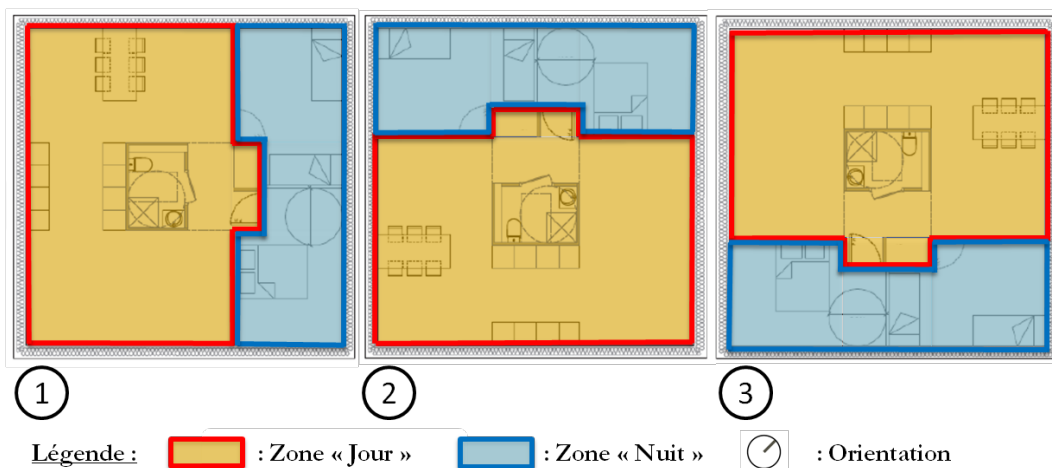


Figure 5-28. Configurations étudiées d'agencement intérieur des pièces de la maison

Pour chacune des façades, une exploration du pourcentage de surface vitrée a été envisagée avec un pas de discrétisation de 10 % (soit 10 niveaux de 0 % à 90 %). L'espace de recherche, uniquement pour cette dernière variable de conception, correspondait déjà à 10 000 combinaisons. Or, au moment de cette étude, l'implémentation informatique de l'algorithme génétique NSGA-II était encore en développement. Des variations paramétriques ont été effectuées, dans le but de réduire cette combinatoire, et de mieux orienter la recherche. Un modèle bizonal de la maison a par ailleurs été créé pour pouvoir étudier les variantes décrites. Toujours dans un souci d'économie de calcul, les pourcentages de surface vitrée par façade ont été explorés en n'en faisant varier qu'un à la fois, et à partir d'une maison « aveugle ». En peu de simulations (une à deux minutes de calcul), il a été possible d'estimer le gain potentiel de valorisation des apports solaires par façade (Figure 5-29). Sans surprise, les façades « nord » (*i.e.* orientées nord-est et nord-ouest) ne présentent pas d'intérêt contrairement aux façades « sud », et particulièrement la façade « sud-ouest ». L'explication provient d'une maison voisine générant un masque proche important sur la façade sud-est, ce qui a poussé à modéliser plus finement les masques proches représentant les maisons avoisinantes (Figure 5-30). Suite à ces observations, la proposition de rendre « aveugle » la façade nord-ouest a été soumise à l'architecte (variante qui sera rapidement retenue), et il a été envisagé d'étudier les façades « nord » uniquement sur trois niveaux (0, 10 et 20 %), réduisant l'ensemble des possibilités de 10 000 à 900. Ce cheminement illustre tout l'intérêt de chercher, d'abord avec des études peu coûteuses en temps de calcul, à bien comprendre les tenants et aboutissants d'un projet, avant de réaliser une optimisation avec un espace de recherche considérable, et dont une région prépondérante ne présenterait pas d'intérêt.

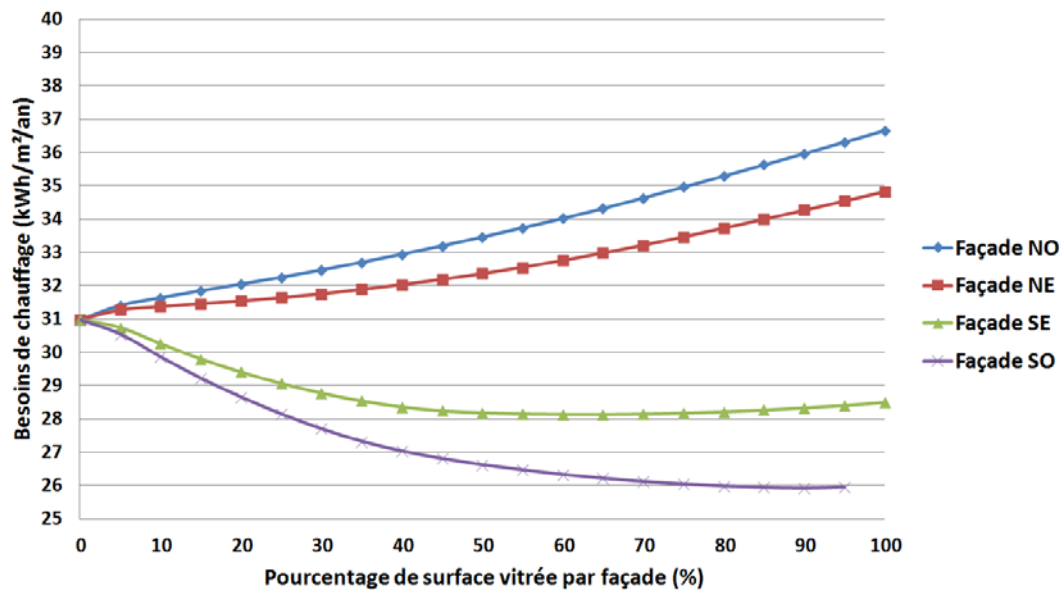


Figure 5-29. Variations paramétriques du pourcentage de surface vitrée par façade, en partant d'une maison « aveugle »

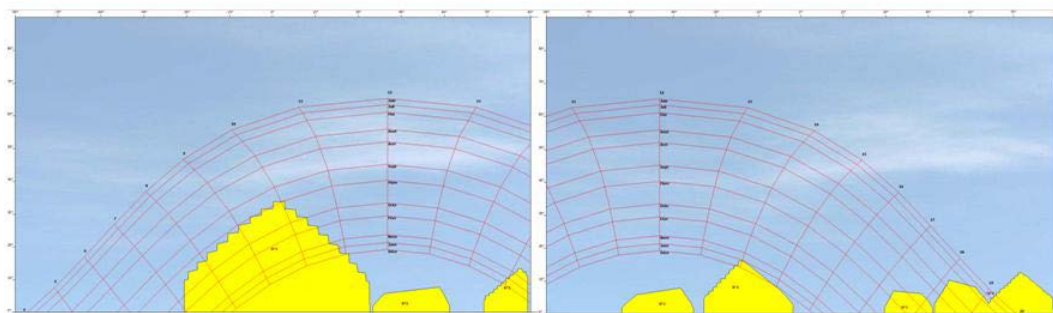


Figure 5-30. Diagrammes solaires pour les façades sud-est (à gauche) et sud-ouest (à droite) avec les masques proches affinés

5.3.1.3. ÉTUDES PAR PLAN FACTORIEL COMPLET

Pour étudier les variantes proposées, des plans factoriels complets (*i.e.* les plans décrivant l'ensemble des combinaisons possibles d'un problème discret) ont été exploités, à défaut de disposer, au moment de cet avancement du projet, d'un algorithme d'optimisation couplé au modèle thermique de bâtiment utilisé. La comparaison des variantes s'effectuait selon deux critères :

- besoins de chauffage en kWh/m² SHAB/an ;
- coût de construction des façades (murs + fenêtres) en € HT / m² SHAB.

Si les données de coût sont confidentielles, la forme des fonctions de coût construites est néanmoins fournie dans l'Annexe H.

Pour ne pas alourdir la présentation, résumons qu'une première étude a permis de confirmer l'intérêt de la géométrie carrée initiale et de rendre

« aveugle » la façade nord-ouest, mais aussi de justifier par des éléments chiffrés, le choix, pour des raisons architecturales (une vue traversante de la rue sud-ouest au jardin), de la configuration n°2 par l'architecte. Une étude de robustesse avait par ailleurs montré que les proportions de surface vitrée observables dans le front de Pareto étaient les mêmes avec deux autres scénarios d'occupation (un scénario moyen « Famille » et un autre « Retraités »). L'étude s'est ainsi concentrée sur la configuration n°2 pour étudier plus précisément les surfaces vitrées de cinq baies envisagées (Figure 5-31). En effet, de nombreuses possibilités restaient irréalistes (façades « aveugles » ou presque entièrement vitrées). Dans cette optique, un échange avec l'architecte a eu lieu pour définir, à travers un cahier des charges, les degrés de liberté et les contraintes sur chacune de ces baies vitrées. La prise en compte de contraintes liées au code de la construction, à des raisons architecturales ou d'autres aspects a permis d'explorer plus finement cet espace de recherche réduit (Figure 5-31).

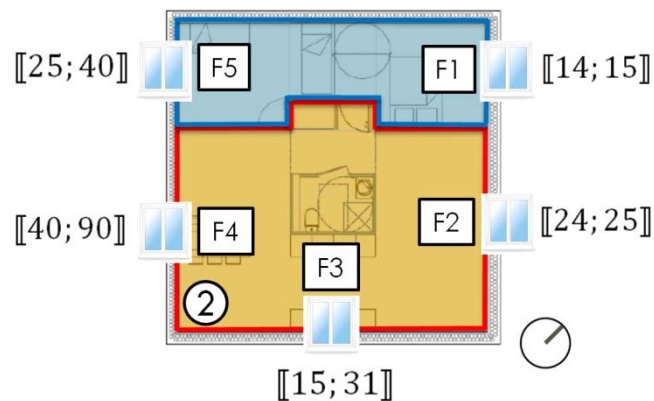


Figure 5-31. Traduction du cahier des charges sur les bornes d'exploration de chaque baie vitrée, cas de la configuration n°2

Les résultats de l'étude préliminaire (avec les trois configurations) et de celle intégrant les contraintes du constructeur sont présentés dans la Figure 5-32. Le calcul des plans factoriels pour chaque configuration (900 combinaisons) durait environ une douzaine de minutes sur un ordinateur de bureau performant. Si le front de Pareto après l'établissement du cahier des charges (en vert) est dominé par celui avant (en bleu), il correspond à des solutions envisageables en pratique pour l'architecte. Signalons que le choix de l'architecte à la fin de cette étape de conception présente un meilleur compromis que les solutions identifiées car il s'est finalement autorisé à réduire légèrement les surfaces vitrées sur les façades « nord ».

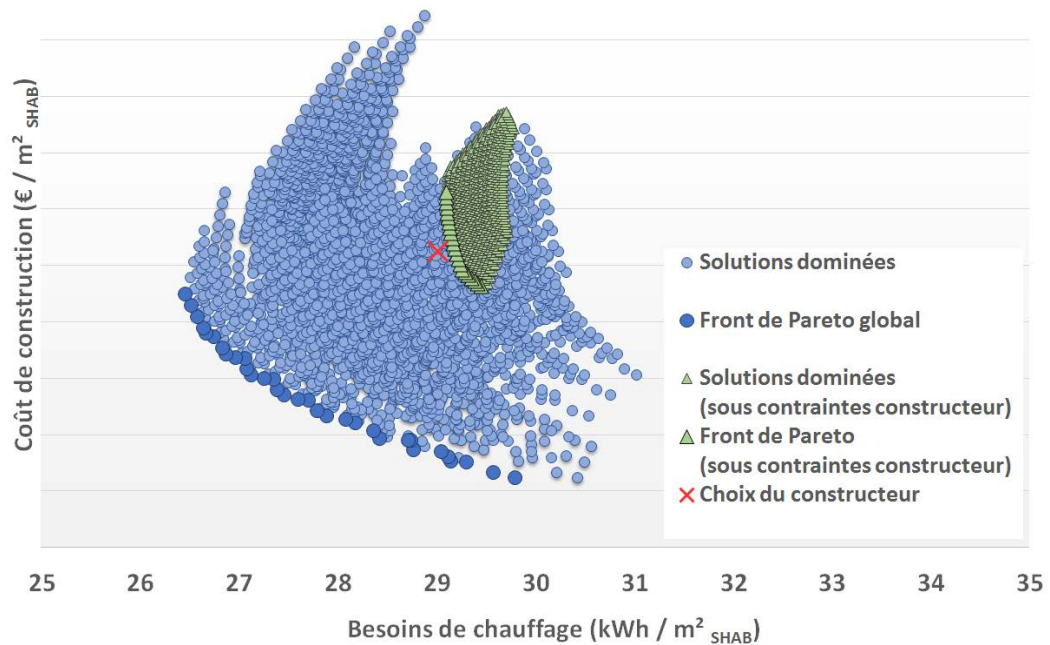


Figure 5-32. Ensemble des solutions étudiées sans intégration des contraintes du constructeur (en bleu) puis avec (en vert)

En conclusion de cette phase de conception amont, il peut être mis en avant l'intérêt d'un processus de conception intégré, permettant des échanges entre l'architecte, chef d'orchestre d'un projet de construction et le thermicien en bureau d'études qui conduisent à orienter de manière plus efficace les efforts de conception. En effet, que ce soit pour des plans factoriels complets mais aussi des algorithmes d'optimisation, l'espace de recherche peut rapidement devenir trop vaste à explorer, et toute la connaissance pouvant être introduite à ce stade accélérera d'autant l'obtention de résultats pertinents par les outils de simulation. À leur tour, ces résultats permettent d'alimenter la discussion entre l'architecte et le thermicien, et donner de nouvelles idées pour améliorer la performance du projet. Au-delà des résultats propres au projet, cette phase de conception amont a illustré cette interaction mutuellement bénéfique entre concepteur et modélisateur, et l'intérêt de réaliser des études rapides mais permettant de fixer les ordres de grandeur du projet, avant de se lancer dans des démarches d'optimisation à proprement parler.

5.3.2. Phase de conception détaillée

Si la phase de conception amont a abordé des aspects relatifs à l'approche bioclimatique (forme architecturale, orientation des pièces, surfaces vitrées) avec des moyens limités (variations paramétriques et plans factoriels complets), et une vision centrée sur les besoins de chauffage, la phase de conception détaillée a

été l'objet d'optimisations plus poussées (algorithme NSGA-II), sur des éléments plus techniques du bâtiment (incluant l'enveloppe et des équipements), avec un regard plus global (bilan énergétique, émissions de GES) et des attentes concrètes (contrainte d'un bilan énergétique positif).

Cette phase peut être dissociée en deux temps, selon l'état d'avancement du développement de la plateforme informatique. Le premier temps correspond au couplage de l'algorithme NSGA-II avec le modèle de simulation thermique dynamique *COMFIE*, autorisant des optimisations sur les aspects énergétiques de la maison, et le second bénéficie de l'ajout du modèle d'analyse de cycle de vie *novaEQUER* dans le couplage préexistant, offrant la possibilité d'étudier les impacts environnementaux du projet. Deux optimisations ont ainsi été menées, dans un contexte d'étude similaire. Pour que les présentations de ces deux études se complètent, certains résultats sont volontairement omis dans l'une mais développés dans l'autre, et inversement.

À ce stade, un demi-étage supplémentaire avec une mezzanine avait été intégré à la maison, et différents autres éléments du projet avaient été fixés par le bureau d'études partenaire du constructeur, depuis les résultats obtenus en phase amont. Notre intervention a alors consisté à chercher des améliorations possibles au projet par rapport à cet état de référence. Les onze paramètres de conception considérés autour de ce cas de base sont synthétisés dans le Tableau 5-8, commun aux deux études menées durant cette phase de conception détaillée. Les paramètres sont séparés en trois catégories :

- celle relative aux **épaisseurs d'isolation** (murs, plancher bas, toiture) ;
- celle relative aux **menuiseries** (surfaces vitrée coté « sud » et type de vitrage coté « nord ») ;
- celle relative aux **équipements** (type de système de ventilation, installation ou non d'un récupérateur de chaleur sur eaux grises, et nombre de modules photovoltaïques).

Tableau 5-8 : Espace de recherche du problème d'optimisation considéré en phase de conception détaillée

Paramètres	Unité	Valeur de base	Borne inf.	Borne sup.	Nb. de niveaux
Épaisseur de laine de verre - murs	cm	22	15	36	8
Épaisseur hourdis polystyrène - plancher	cm	22	15	36	8
Épaisseur de laine de verre – toiture	cm	26	12	28	8
Surface de la fenêtre 1 (sud-est)	m ²	3	2	5	4
Surface de la fenêtre 2 (sud-est)	m ²	1,46	1,46	2,92	2
Surface de la fenêtre 3 (sud-ouest)	m ²	6,88	0	10,5	4
Surface de la fenêtre 4 (sud-ouest)	m ²	2,71	2,71	5,42	2
Type de vitrage en façade nord-est*	-	DV	DV	TV	2
Système de ventilation*	-	DF	SF	DF	2
Récupérateur de chaleur sur eaux grises	-	Non	Non	Oui	2
Nombre de modules photovoltaïques	-	12	1	28	16

* DV : double-vitrage, TV : triple-vitrage, SF : simple-flux, DF : double-flux, surface d'un module photovoltaïque : 1,6 m²

Du fait de l'existence d'interactions entre ces paramètres, nous avons souhaité affiner les valeurs des surfaces vitrées (Figure 5-33). Malheureusement, les nombreuses modifications du projet entre ces études et celles en phase amont ont rendu trop complexe l'analyse croisée des résultats. Les bornes inférieure et supérieure auraient pu être ajustées différemment, mais l'objectif prioritaire était d'illustrer la faisabilité et l'intérêt de la démarche plutôt que d'obtenir des résultats très précis sur l'étude de cas considéré. À ce titre, les nombres de niveaux choisis sont peu élevés, de manière à avoir une combinatoire (4 194 304) encore potentiellement calculable de manière exhaustive (§ 5.3.2.2), permettant ainsi une exploration intéressante et réaliste en pratique. L'Annexe H fournit, quand elles ne sont pas confidentielles, les fonctions de coût considérées.



Figure 5-33. Illustration des quatre baies vitrées explorées dans le Tableau 5-8

5.3.2.1. OPTIMISATION BILAN ÉNERGÉTIQUE / COÛT DE CONSTRUCTION

Cette étude a porté sur l'optimisation conjointe du bilan énergétique et du coût de construction, avec ou sans contrainte de bilan positif. Plus précisément, le critère énergétique, appelé « écart à l'énergie positive », est défini comme la différence, sur l'année, entre l'ensemble des consommations (chauffage, ECS, électricité spécifique, auxiliaires) et la production d'énergie renouvelable (ici photovoltaïque), et le critère financier correspond à la différence de coût de construction entre une variante et le cas de base. Un bilan négatif (consommations supérieures à la production) aura donc un écart à l'énergie positive supérieur à 0 ; de même, un projet plus cher que le cas de base aura une différence de coût positive.

Sur la Figure 5-34 peut être observée l'évolution du front de Pareto approché de rang 1 à différentes générations. Cela permet de suivre le comportement de l'algorithme au fil du processus. En effet, lors des premières générations (jusqu'à 10 environ), le front semble progresser rapidement alors qu'ensuite, il a plutôt tendance à stagner mais à se densifier. Trois points singuliers ont également été tracés : le cas de base, et les points Idéal et Nadir. Ces deux derniers, quand il est possible de les calculer⁸⁰, permettent de borner le problème d'optimisation ce qui peut donner des informations sur la convergence de l'algorithme. Dans cet exemple, les extrémités du front de Pareto final ont quasiment atteint les bords de l'espace de recherche, ce qui peut être une condition nécessaire mais non suffisante pour confirmer que le front de Pareto optimal a été atteint. Si cela ne sera développé que dans l'étude suivante, signalons que le front de Pareto optimal a pu être calculé et qu'il a permis de valider, sur l'étude de cas considéré, que l'algorithme avait convergé vers celui-ci. Il peut être observé

⁸⁰ dans le cas présent, les problèmes monocritères pouvaient effectivement être résolus par un plan factoriel de 256 combinaisons pour le bilan énergétique, et analytiquement pour le coût

qu'un ensemble de solutions domine le cas de base (zone entourée de tirets rouges), ce qui indique que des solutions à la fois moins chères et plus performantes ont été trouvées. Cette zone est donc de premier intérêt pour le concepteur. Dans cette première optimisation, aucune contrainte de bilan énergétique positif n'a été fixée, ainsi seul un quart environ du front respecte cette contrainte (partie en haut à gauche). Une seconde optimisation intégrant la contrainte a été menée, expliquant la densification observée dans la zone d'intérêt (Figure 5-35). Contrairement au Tableau 5-8, le nombre de modules photovoltaïques dans le cas de base est de 20 (au lieu de 12), permettant d'atteindre un bilan énergétique positif. Pour des raisons économiques, ce nombre a été réduit à 12 par la suite, même si cela ne permet pas d'atteindre un bilan positif.

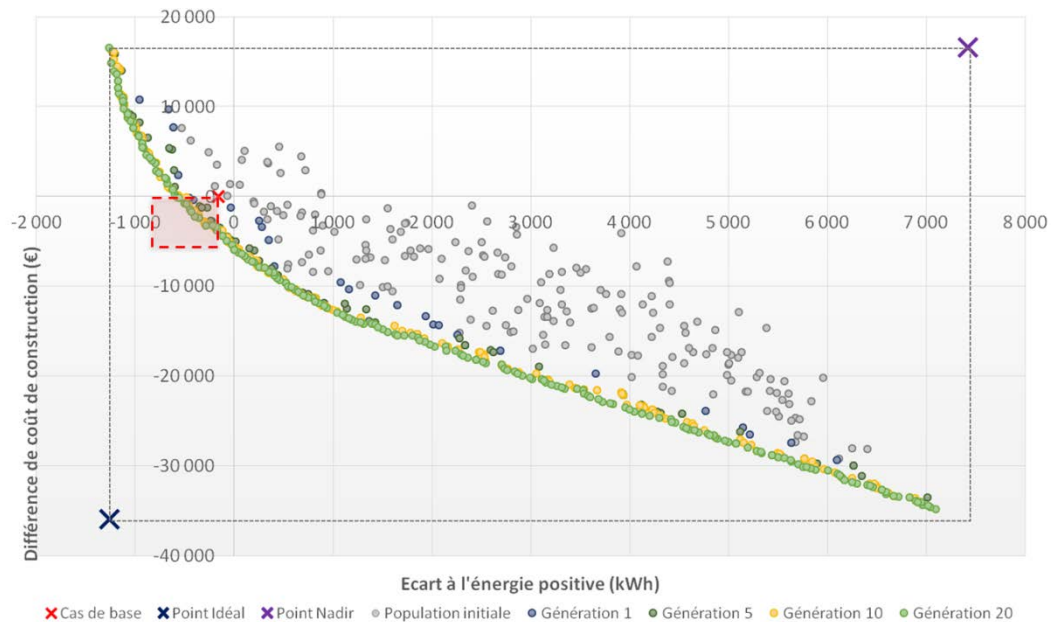


Figure 5-34. Évolution du front de Pareto de rang pour l'optimisation « bilan énergétique en fonction du coût de construction »

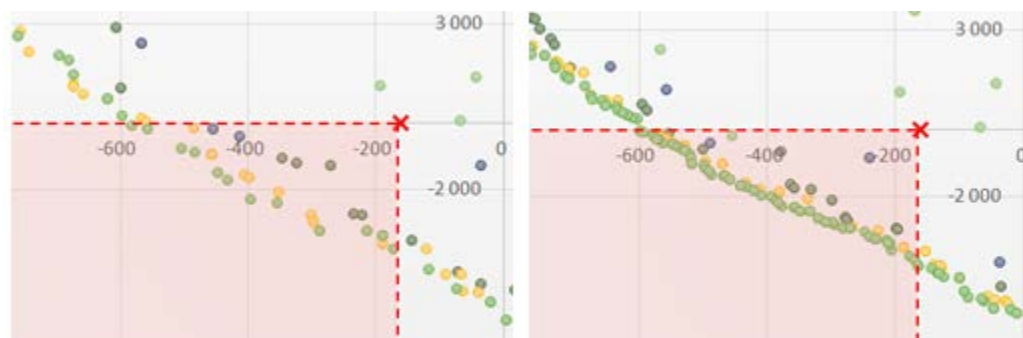


Figure 5-35. Solutions identifiées dans la zone d'intérêt par l'optimisation sans (à gauche) et avec (à droite) la contrainte de bilan énergétique positive

Dans une démarche d'aide à la décision pour la conception de bâtiments, trois types d'informations pouvant être extraites du front de Pareto nous semblent être pertinentes pour assister le concepteur dans ses choix :

- l'obtention d'une solution non-dominée en fixant des seuils sur les fonctions objectifs ;
- l'analyse de l'évolution des caractéristiques du front en classant les solutions selon leurs valeurs vis-à-vis d'une fonction objectif ;
- l'analyse statistique des caractéristiques des solutions appartenant à une zone particulière du front ou au front dans sa totalité.

En ce qui concerne le premier type, le front de Pareto obtenu permet au concepteur de disposer d'un ensemble de meilleurs compromis du problème d'optimisation posé. Sur cette base, le concepteur peut alors faire des arbitrages pour choisir la solution la plus adaptée à ses besoins. Par exemple, il peut souhaiter la solution à énergie positive la moins chère ou se fixer un budget maximal, et trouver la solution non-dominée la plus performante respectant ce budget. Ce premier type d'informations est le plus simple à comprendre, mais nécessite de fixer la valeur de toutes les fonctions objectifs sauf une, pour identifier la meilleure solution dans le contexte considéré. Au-delà de deux critères, l'interprétation des résultats est plus complexe notamment de par une représentation plus délicate des fronts de Pareto.

Le second type d'informations nous semblant pertinent pour les concepteurs qui utiliseraient ce genre de démarche à l'avenir, est illustré dans la Figure 5-36, pour le cas des équipements. Les individus du front de Pareto ont été classés de 1 à 200, dans le sens décroissant de l'écart à l'énergie positive, c'est-à-dire dans le sens des individus de plus en plus performants énergétiquement. Il est possible d'analyser l'évolution des caractéristiques de ces individus, en les parcourant via cet ordre de classement. Dans notre exemple, les caractéristiques ont été moyennées tous les 10 individus pour lisser les courbes. Il peut être observé que l'algorithme privilégie d'abord l'augmentation du nombre de modules photovoltaïques jusqu'à atteindre le nombre maximal, et seulement à partir de là, propose massivement l'installation du récupérateur de chaleur sur eaux grises. Le même constat peut être fait avec le système de ventilation qui évolue seulement après que le récupérateur a été installé. Vu de manière très concrète, cela signifie que si le concepteur dispose d'un euro supplémentaire à investir dans les équipements pour améliorer la performance énergétique du projet, alors l'augmentation du nombre de modules photovoltaïques est l'option la plus intéressante, devant l'installation d'un récupérateur de chaleur sur eaux grises, et enfin le passage d'une VMC simple-flux à une VMC double-flux. Ce type d'analyse des données peut ainsi fournir au concepteur l'ordre le plus efficient des choix de conception à mettre en œuvre pour tendre vers un objectif donné. Ceci nous apparaît comme tout à fait pertinent dans un contexte d'aide à la décision. Au-delà de deux critères, l'interprétation des résultats nécessite de se

ramener à des couples de deux critères en fixant les autres (projections de l'hypersurface de compromis sur un plan de dimension 2).

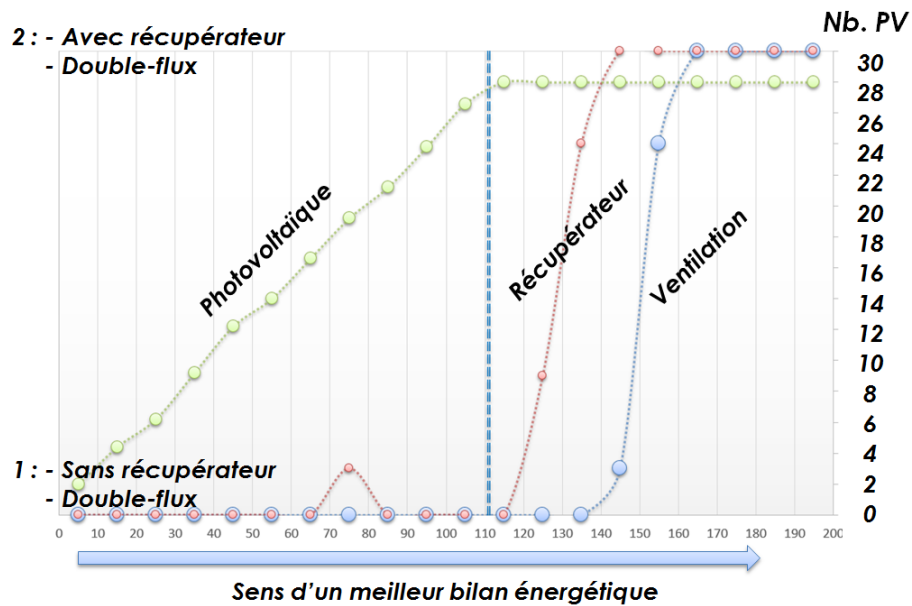


Figure 5-36. Ordre des choix les plus efficaces à mettre en œuvre pour tendre vers un meilleur bilan énergétique

5.3.2.2. OPTIMISATION ÉMISSIONS DE GES / COÛT DE CONSTRUCTION

Cette étude constitue le prolongement de l'étude précédente, en y intégrant les aspects environnementaux, et a fait l'objet d'une communication (Recht, Robillart, et al. 2016). Les émissions de GES remplacent, comme fonction objectif, le critère énergétique précédent, et la contrainte de bilan énergétique positif est intégrée. La formulation de ce problème d'optimisation correspond davantage à l'objectif de ces travaux. En effet, nous ne cherchons pas à maximiser le bilan énergétique, mais bien plutôt à minimiser les impacts environnementaux, en respectant un bilan supérieur ou égal à zéro. Si l'implémentation informatique développée permet de calculer les 12 indicateurs disponibles dans *novaEQUER*, cette étude n'a retenu que les émissions de GES, permettant de valider et d'illustrer la démarche sur un cas simple. Par la suite, il serait bien entendu intéressant de considérer davantage indicateurs dans l'optimisation, conformément à l'approche multicritère d'une ACV. Sachant qu'un nombre plus élevé de fonctions objectifs peut complexifier le problème d'optimisation, une sélection parmi les 12 disponibles semble être un bon compromis. Ce choix pourra notamment se baser sur :

- des **éléments réglementaires** : l'article L111-9⁸¹ du code de la construction impose par exemple de prendre en compte à partir de 2018, pour les nouvelles constructions, la performance énergétique, les émissions de GES, la consommation d'eau et la production de déchets ;
- des **retours d'expérience** : comme par exemple dans le projet COMEPOS où l'ACV de plus d'une vingtaine de MEPOS sera réalisée dans un cadre cohérent, ce qui permettra d'identifier quels sont les impacts prépondérants dans ce contexte, et de les intégrer prioritairement dans les études d'optimisation ;
- le **principe de précaution** : par exemple appliqué au nucléaire où le récent accident nucléaire de Fukushima (2011) a rappelé celui de Tchernobyl (il y a 30 ans exactement), et que cette technologie présentait des risques qu'il pourrait être bon d'intégrer dans le processus de décisions.

Pour simuler le projet sur tout le cycle de vie, l'ensemble de la modélisation environnementale présentée au § 5.2.2.5 a été mise en œuvre.

La Figure 5-37 donne une vue d'ensemble de l'exploration menée, en affichant le cas de base, la population initiale et le front de Pareto de rang 1 à la dernière génération. Les solutions respectant la contrainte (bilan positif) sont en ronds pleins, et les autres en ronds creux. Nous pouvons noter qu'avec 12 modules photovoltaïques, le cas de base ne présente pas un bilan énergétique positif. Il peut également être noté que la population initiale est répartie en deux sous-ensembles. Ceci s'explique par l'influence du type de système de ventilation, permettant de réduire significativement les déperditions thermiques de la maison et présentant un meilleur bilan en CO₂ malgré les émissions supplémentaires lors des étapes de fabrication et de renouvellement de l'équipement. Au sein de la population initiale, une majorité des solutions ne respecte pas la contrainte (« non MEPOS » dans la légende), c'est pourquoi le front de Pareto obtenu se situe dans une région limitée de l'espace de recherche.

⁸¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000022493184&cidTexte=LEGITEXT000006074096>

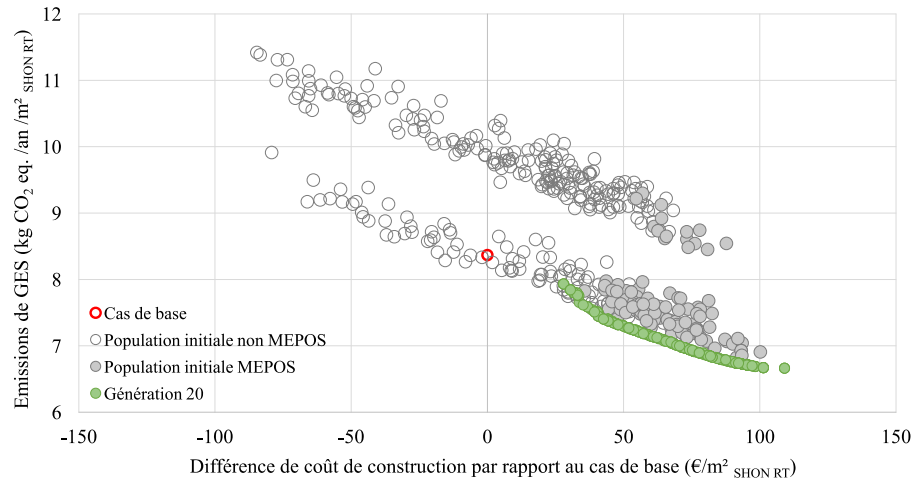


Figure 5-37. Cas de base, population initiale, et front de Pareto de rang 1 final

À travers la Figure 5-38, nous développons l'un des aspects que nous n'avions volontairement pas traité dans l'étude précédente, malgré un travail identique. Il s'agit de vérifier que l'apparente convergence du front de Pareto approché vers le front optimal (appelé également « théorique » sur la figure) est effective. Pour ce faire, les 4 194 304 combinaisons du problème ont été évaluées, permettant l'identification du front optimal. En pratique, un nombre réduit de simulations thermiques dynamiques a été nécessaire, car certaines variables n'influent pas sur les besoins de chauffage. Les résultats concernant les modules photovoltaïques, et le récupérateur de chaleur sur eaux grises peuvent en effet être obtenus de manière indépendante, par des calculs rapides. Avec un processeur 6 cœurs Intel® Xeon® E5-1650 (3.20 GHz), les 131 072 simulations thermiques ont été réalisées en un jour et demi (35 h). Les individus du front optimal obtenus sont représentés par les points bleus foncés de petite taille dans la Figure 5-38. À l'exception de quelques individus (pour les plus grandes émissions en GES notamment), le front de Pareto approché obtenu par l'algorithme génétique est confondu avec le front de Pareto optimal. En 8 000 évaluations (20 générations d'une population de 400 individus) et un peu plus de deux heures de calcul, l'algorithme NSGA-II a exploré efficacement l'espace de recherche. Au vu de la richesse des informations pouvant être extraites, ce temps de calcul apparaît acceptable pour une utilisation future de ce genre de démarche d'optimisation par les bureaux d'études. À noter que la réalisation des simulations ACV a allongé d'environ 30 % la durée du processus par rapport à une optimisation avec uniquement des simulations thermiques.

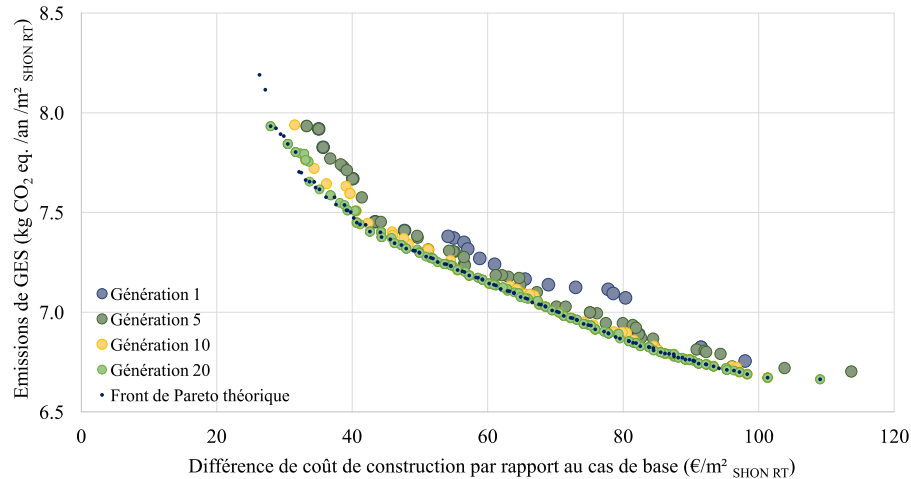


Figure 5-38. Évolution des fronts de Pareto de rang 1 et front de Pareto optimal

L'aspect que nous n'avions pas développé dans l'étude précédente était l'illustration du troisième type d'informations pouvant être exploité pour alimenter le processus d'aide à la décision. Outre fixer des seuils aux fonctions objectifs pour déterminer une seule solution ou identifier un ordre le plus efficient des choix de conception à réaliser, il est également possible d'analyser statistiquement un ensemble de solutions non-dominées (pouvant être le front de Pareto en entier), et observer si des tendances globales se dégagent. La Figure 5-39 illustre cette analyse pour les fronts de Pareto approché et optimal, dans le cas des équipements. Concernant le nombre de modules photovoltaïques, il peut être remarqué l'existence de compromis, mais aucun individu de ces deux fronts ne présente moins de 22 modules. La plus forte occurrence (37 % pour le front approché, et 39 % pour le front optimal) est associée à la borne supérieure de ce paramètre, *i.e.* 28 modules. À l'inverse, les résultats pour les autres équipements mettent en évidence l'existence de solutions privilégiées (identiques pour les fronts approché et optimal), à savoir uniquement des triples-vitrages sur la façade nord-est et un système de ventilation double-flux, et quasiment jamais de récupérateur de chaleur sur eaux grises. En pratique, cela signifie qu'installer par exemple une VMC simple-flux entraîne nécessairement que le concept soit sous-optimal, et donc dominé par un autre concept. Ce type d'informations (analyse statistique des caractéristiques du front) apparaît comme particulièrement intéressant pour assister le concepteur dans ses choix. De plus, il a pour caractéristique d'être calculé de manière identique pour un nombre de critères supérieur à deux.

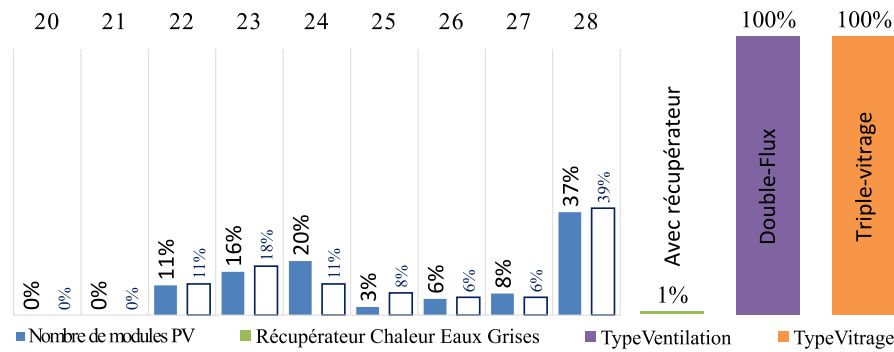


Figure 5-39. Caractéristiques des fronts de Pareto approché (rectangles bleus) et optimal (rectangles blancs) concernant les équipements

Si dans ces deux études, l'analyse des résultats a porté sur les équipements, elle sera élargie dans la section 5.4.2. La vérification *a posteriori* du confort, annoncée dans la partie 1.4, sera uniquement développée dans la section 5.4.2, consacrée à l'intégration des effets du changement climatique dans le processus de décision.

5.3.3. Conclusion de la partie

L'objet de cette partie était l'application de la démarche proposée dans ces travaux sur une étude de cas réel. Via une collaboration avec un constructeur de maisons individuelles dans le cadre du projet COMEPOS, la démarche a effectivement été testée lors d'un processus de conception intégrée incluant chercheurs, industriels et constructeurs. Les enseignements tirés vis-à-vis de la problématique de l'écoconception de maisons à énergie positive ont été les suivants.

Il semble tout d'abord que d'un point de vue pratique, une aide à la décision assistée par optimisation multicritère soit possible au vu des temps d'exécution constatés (entre 2 et 3 heures pour l'étude de cas considérée) mais aussi par rapport à la convergence tout à fait satisfaisante observée lors des études en phase de conception détaillée, et sur des problèmes certes réduits, mais non triviaux. L'expérience de la collaboration menée avec l'architecte responsable du projet a par ailleurs mis en évidence toute l'importance d'ajouter le maximum de connaissances dans la formulation du problème d'optimisation, et l'intérêt d'échanges itératifs entre le concepteur et le modélisateur. En effet, si l'outil d'optimisation est au service du concepteur pour lui permettre d'explorer de manière approfondie son projet, le concepteur doit aussi orienter l'outil vers des espaces de recherche pertinents. La démarche étudiée nous semble donc fondamentalement itérative, et graduelle. Sur l'étude de cas considérée, elle a

orienté à plusieurs reprises les décisions de l'architecte, comme par exemple le choix de rendre la façade nord-ouest « aveugle », la détermination des surfaces vitrées, ou encore le passage d'une VMC simple-flux à une VMC double-flux. Trois principaux types d'informations pouvant être extraites de manière générique des résultats d'optimisation ont été illustrés, et participent selon nous, à une aide à la décision d'un nouveau genre. Des travaux complémentaires pourraient être notamment conduits sur des optimisations en plus grande dimension (dans l'espace des fonctions objectifs), pour évaluer l'influence du nombre de critères sur la vitesse de convergence et les possibilités d'analyses des données. Plusieurs pistes ont été proposées concernant l'exploitation des résultats d'optimisation par le concepteur ; l'application de méthodes d'aide multicritère à la décision semble un prolongement assez naturel de ces travaux.

5.4. ÉTUDE DE LA ROBUSTESSE DES SOLUTIONS

La partie 5.3 précédente a illustré le large éventail d'études pouvant être menées pour fournir une aide à la décision en phase de conception. Pour identifier les meilleurs concepts possibles de MEPOS au sens du problème d'optimisation formulé, ces travaux ont exploré différents paramètres propres au système étudié (la maison et ses équipements). Néanmoins, il existe des interactions entre ce système et tout ce qui est considéré comme hors des frontières du système étudié, et pouvant évoluer. C'est par exemple le cas du contexte socio-économique, du climat ou encore des infrastructures. Dans cette section, nous proposons de questionner l'influence d'une évolution des occupants et du climat sur les résultats obtenus à l'issue du processus de conception. L'objectif est d'étudier le risque de non-optimalité d'une décision, vis-à-vis d'un changement de type du ménage ou d'une évolution du climat.

5.4.1. Robustesse au changement de type du ménage

5.4.1.1. INTRODUCTION

Par rapport à la problématique liée à la longue durée de vie des bâtiments, cette section vise à évaluer l'incidence d'un changement de type du ménage occupant la maison. En effet, il est fort probable qu'au cours de son cycle de vie, la maison soit successivement occupée par différents ménages, pouvant présenter des caractéristiques et des comportements relativement différents. Par exemple, par rapport à une personne active, un couple de retraités sera statistiquement davantage présent dans le logement, avec un chauffage continu sur la journée, et une consigne de température généralement plus haute.

La question que nous avons investiguée était de savoir si un concept de maison optimisé pour un type de ménage pouvait le rester pour un autre type de ménage.

Nota : le travail retranscrit dans cette section a fait l'objet d'une communication (Recht, Schalbart, et al. 2016) pour la conférence anglophone « Building Simulation & Optimization 2016 » (BSO2016), expliquant que certaines figures ne soient pas en français.

5.4.1.2. MÉTHODOLOGIE

❖ Démarche générale

Pour répondre à cette question, nous avons décidé de comparer les résultats d'optimisations menées avec trois types de ménages probables pour la maison étudiée. Tout comme les études précédentes, le même ménage est considéré tout au long de la simulation du cycle de vie. Si cela peut paraître contradictoire avec la vraisemblable réalité dans laquelle plusieurs ménages se succéderaient, cela reste cohérent et pertinent avec l'objectif énoncé. Comme support d'étude, nous avons repris, dans sa grande majorité, l'optimisation présentée dans le paragraphe 5.3.2.2 (Recht, Robillart, et al. 2016). La principale différence réside dans le changement du modèle de mix énergétique : le mix dynamique par usage précédemment utilisé (Herfray 2011) a été remplacé par un mix dynamique global (Peuportier et Herfray 2012), ce qui met en évidence l'influence de ce choix de modélisation.

❖ Types de ménages modélisés

Les trois types de ménages considérés, visent à représenter :

- un jeune couple d'actifs avec un enfant en bas âge (il s'agit du ménage précédemment utilisé, qui sert de référence) ;
- un couple de retraités ;
- une personne occupant seule la maison.

À l'instar de la construction des scénarios moyens pour le jeune couple d'actifs, nous avons mis à contribution un modèle stochastique d'occupation pour établir des scénarios d'usage moyens pour les deux nouveaux types de ménages. Les caractéristiques socio-démographiques de ces ménages sont résumées dans le Tableau 3-1, au sens des variables discriminantes retenues dans le modèle d'occupation. La description de ces variables est accessible dans le chapitre 3 de la thèse de Vorger (2014).

Tableau 5-9 : Caractéristiques socio-démographiques des nouveaux ménages étudiés (au sens des variables discriminantes retenues dans le modèle d'occupation)

Caractéristiques	Retraités	Personne seule
<i>hhtype</i>	Couple seul	Non spécifié
<i>ownhome</i>	Propriétaire	Propriétaire
<i>age</i>	70 - 65	40
<i>sex</i>	Homme – Femme	Non spécifié
<i>famstat</i>	Adulte âgé de plus de 40 ans sans co-résident mineur	Non spécifié
<i>retired</i>	Oui	Non
<i>empstat</i>	-	Temps plein
<i>workhrs</i>	-	> 40
<i>vehicle</i>	Non spécifié	1

Les facteurs de conversion entre consommation électrique et puissance dissipée (§ 4.4.3.3) sont de : 0,92 pour la famille de jeunes actifs, 0,93 pour les retraités, et 0,96 pour la personne seule.

❖ Analyses des ménages générés

Avant de présenter les résultats obtenus, nous présentons dans le Tableau 5-10 les principales caractéristiques énergétiques annuelles associées à chaque ménage, simulées dans le cas de base. Les valeurs sont exprimées en énergie finale, rapportée à un m² de surface habitable. Il peut par exemple être observé que les retraités, pourtant moins nombreux, dégagent autant de chaleur métabolique que la famille, ce qui traduit bien une présence accrue dans le logement. Les besoins de chauffage de la personne seule sont supérieurs à ceux des deux autres ménages, principalement en raison des apports internes (chaleur métabolique et puissance dissipée par les appareils électriques) nettement plus faibles. La famille présente des besoins de chauffage moindres par aux retraités, ce qui s'explique en majorité par un taux d'occupation plus réduit (pour rappel, un réduit sur la consigne de température est appliquée en inoccupation) et des apports internes dus à l'électricité spécifique plus élevés. Les bilans concernant l'eau chaude sanitaire sont, quant à eux, logiquement proportionnels au nombre de membres du ménage.

Tableau 5-10 : Principales caractéristiques énergétiques annuelles (en énergie finale) des trois ménages étudiés

Caractéristiques	Famille	Retraités	Personne seule
Chaleur métabolique (en kWh/m ² SHAB)	10,2	10,3	3,7
Besoins de chauffage (en kWh/m ² SHAB)	22,7	25,3	28,7
Eau chaude sanitaire (en kWh/m ² SHAB)	10,5	8,3	4,2
Électricité spécifique (en kWh/m ² SHAB)	20,3	17,9	13,0
Température de consigne, zone jour (°C)	19,1	19,5	19,1
Température de consigne, zone nuit (°C)	18,8	18,9	18,7

5.4.1.3. RÉSULTATS

Pour faciliter la discussion autour des résultats, les scénarios d'occupation représentant les trois ménages seront respectivement noté S1 (pour la famille), S2 (pour les retraités), et S3 (pour la personne seule). De plus, nous avons sélectionné les plus pertinents pour illustrer l'application de la démarche développée. Plus de détails sont disponibles dans la communication à la conférence BSO2016 (Recht, Schalbart, et al. 2016).

La Figure 5-40 présente les fronts de Pareto approchés associés à chaque ménage. De manière cohérente avec les caractéristiques énergétiques des ménages (Tableau 5-10), les émissions de GES différent pour chacun d'eux. Si S3 présente les besoins de chauffage les plus élevés, il affiche néanmoins les émissions les plus faibles puisque son bilan énergétique est nettement moins pénalisé par les postes ECS et électricité spécifique. S1 et S2 présentent quant à eux des fronts relativement proches, ce qui apparaît logique au vu de leurs caractéristiques énergétiques relativement similaires. Bien que non affiché sur la figure, il a été observé que l'existence des solutions privilégiées de S1, *i.e.* l'installation de menuiseries en triple-vitrage en façade nord-est et d'une VMC double-flux, était conservée pour S2 et S3. En effet, dans les fronts associés à ces trois ménages, 99 à 100 % des individus disposaient de triple-vitrage en façade nord-est, et 98 à 100 % d'une VMC double-flux. En revanche, des écarts dans les choix de conception sont observables pour le nombre de modules photovoltaïques et l'installation ou non d'un récupérateur de chaleur sur eaux grises (Figure 5-41). Plus le ménage est consommateur, plus les individus du front disposeront (statistiquement) d'un nombre élevé de modules photovoltaïques et d'un récupérateur de chaleur sur eaux grises.

Signalons ici la divergence majeure dans les résultats avec l'étude précédente (Recht, Robillart, et al. 2016), à savoir qu'il n'y avait que 1 % des

individus du front qui présentaient un récupérateur de chaleur sur eaux grises alors qu'il y en a 50 % dans cette étude. L'explication principale provient du fait, que dans le modèle de mix dynamique par usage, l'ECS est considérée comme un poste majoritairement satisfait pour la production électrique de base. En effet, cet usage fait appel à de l'électricité toute l'année et majoritairement en heures creuses, ce qui n'induit pas de production de pointe comme le chauffage. Or, en France, la production de base est en grande partie d'origine nucléaire, source énergétique émettant très peu de GES. Dans ce cas, l'installation d'un récupérateur de chaleur sur eaux grises devient beaucoup moins intéressante vis-à-vis du problème d'optimisation. Sans être l'objet premier de cette étude, cette observation met en évidence que le mix électrique peut avoir un effet significatif sur la robustesse des décisions. Ce paramètre a d'ailleurs été identifié comme l'un des plus influents lors d'une analyse de sensibilité sur différentes entrées d'un modèle d'ACV (Pannier et al. 2016b). Par conséquent, il semble justifié de prendre en compte les interactions entre les usages et le système de production électrique. Des développements sont en cours à ce sujet dans une démarche d'ACV conséquentielle ce qui constitue une autre perspective pour cette étude.

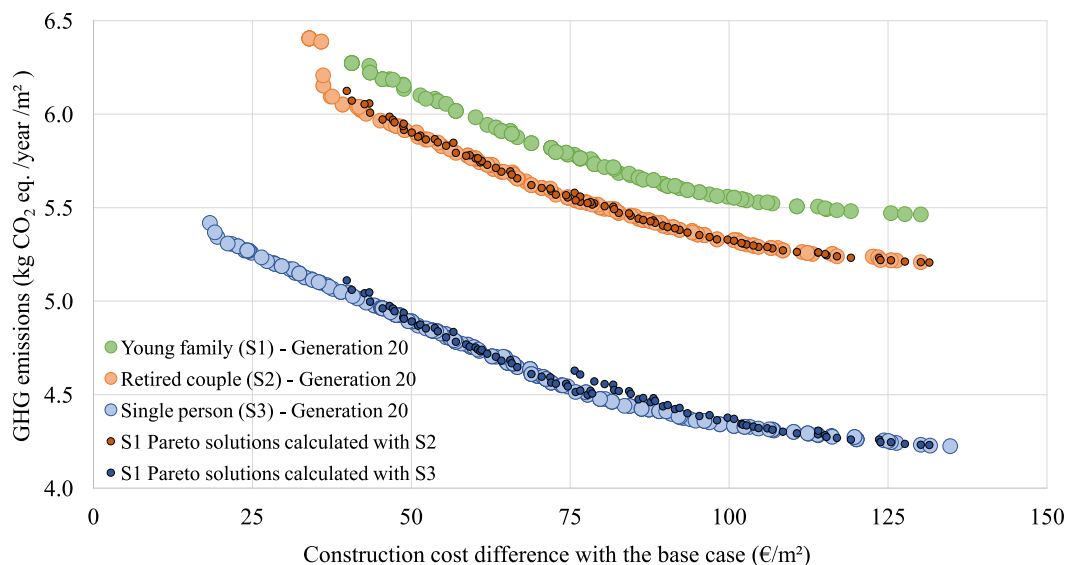


Figure 5-40. Comparaison des fronts de Pareto approchés pour les trois ménages étudiés

Dans la Figure 5-40, remarquons que les deux individus les moins onéreux dans le front de S2 présentent une VMC simple-flux, alors que dans le front optimal de S1, tous disposent d'une VMC double-flux (Recht, Schalbart, et al. 2016). Soit ces individus ne sont pas optimaux, soit leur présence pourrait s'expliquer par le fait, qu'avec un bilan énergétique positif légèrement plus facile à atteindre pour S2 que pour S1, l'optimisation peut alors trouver des individus non-dominés présentant une VMC simple-flux. L'interprétation est néanmoins complexe

puisque le calcul des émissions de GES avec un mix énergétique dynamique nécessiterait d'analyser les profils horaires de consommations électriques. Du fait que ces individus n'apparaissent pas dans S3, aucune explication simple ne peut fournie, et une étude plus approfondie des résultats serait requise pour conclure sur la validité de l'une de ces deux hypothèses.

Dans une dernière étape, nous avons recalculé les 90 solutions uniques du front de S1, avec les scénarios d'occupation de S2 et S3 pour observer si ces concepts restent ou non performants avec d'autres types d'habitants. Pour chaque solution du front de S1, nous avons remplacé les scénarios d'occupation de S1 par ceux de S2 et recalculé les performances (« *S1 Pareto solutions calculated with S2* » dans la Figure 5-40). Cela revient à utiliser les valeurs des variables de conception optimale de S1 dans un autre contexte (S2). Nous avons procédé de même pour S3 (« *S1 Pareto solutions calculated with S3* » dans la Figure 5-40). Ces solutions correspondent aux ronds de petite taille. Les résultats montrent que, pour les variables de conception étudiées, et dans le problème d'optimisation tel que formulé, les solutions apparaissent comme globalement robustes, notamment pour S2. Lorsque le front de S2 (respectivement S3) est comparé avec le front de S1 calculé avec les scénarios de S2 (respectivement S3), il peut être remarqué que les solutions les moins chères sont perdues. Pour S3, il s'agit notamment de solutions avec un nombre de modules photovoltaïques bas, et des solutions à VMC simple-flux pour S2. Pour S3, il est également observé que certaines de ces solutions s'éloignent davantage des autres du front. Elles correspondent à la présence d'un récupérateur de chaleur sur eaux grises, qui est bien moins souvent pertinent avec le ménage S3 qu'avec le ménage S1. Néanmoins, la majorité des solutions reste très proche du front S3.

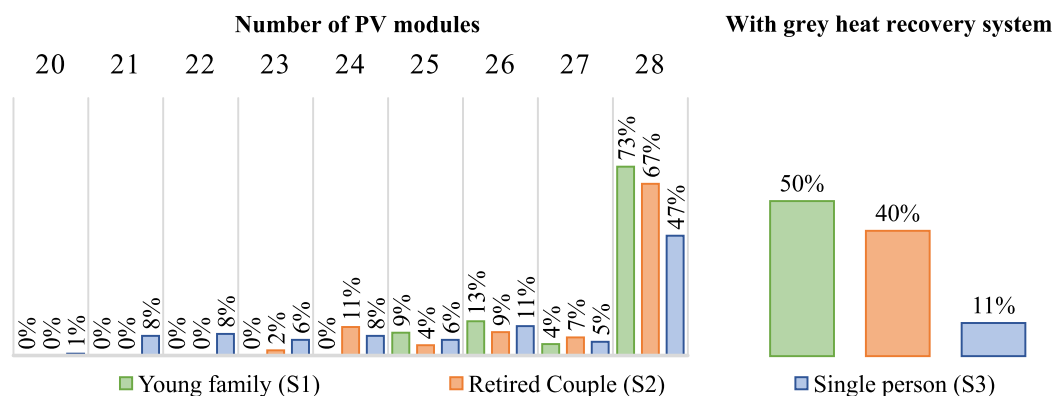


Figure 5-41. Comparaison des caractéristiques des fronts associés à chaque ménage

5.4.1.4. CONCLUSION

Cette étude avait pour principal objectif d'apporter une contribution dans le développement d'une méthodologie globale qui permettrait d'intégrer les effets du type de ménage sur le processus de décision. Dans cette optique, trois types probables de ménages pouvant successivement occuper le logement ont été représentés à l'aide de scénarios d'usage moyens générés par un modèle stochastique d'occupation. Le processus d'optimisation multicritère de la démarche proposée a été mené pour chacun de ces types de ménages, offrant la possibilité d'analyser les différences de caractéristiques des fronts de Pareto obtenus. Une seconde approche pour étudier la robustesse des solutions a également été explorée, et a consisté à recalculer les solutions d'un front associé à un ménage, avec les scénarios d'occupation des autres ménages. Sur l'étude de cas considérée, ce calcul n'a été effectué que pour S1, mais les résultats obtenus ont montré que cette approche permettait d'apporter des informations intéressantes, invitant à réitérer le calcul pour S2 et S3. Si certains choix de conception sont apparus inchangés en fonction du type de ménages (cas du type de vitrage pour les menuiseries en façade nord-est et du type de système de ventilation), d'autres ont présenté une dépendance nette au ménage simulé (cas du nombre de modules photovoltaïques et surtout de l'installation ou non d'un récupérateur de chaleur sur eaux grises). Mettons en perspectives ces résultats avec le fait que la maison est « tout électrique », et que les différences auraient été probablement plus marquées si la maison présentait plusieurs vecteurs énergétiques. En effet, si le bilan énergétique global pouvait être considéré comme relativement équivalent entre les ménages, les profils de consommation par poste étaient bien plus contrastés, invitant à penser que les émissions de GES auraient varié de manière plus importante. Pour conclure, cette étude a permis d'explorer une démarche originale pour évaluer le risque de non-robustesse d'une décision vis-à-vis d'un changement de type de ménage. À notre connaissance, il s'agit de la première fois qu'optimisation multicritère et modélisation stochastique du comportement des occupants sont associées dans un tel contexte. L'intérêt et la faisabilité de cette démarche ont été confirmés sur l'étude de cas sur laquelle elle a été appliquée. Néanmoins, comme tout travail exploratoire, il serait utile de reproduire le même type d'étude sur d'autres cas pour renforcer ces conclusions.

5.4.2. Robustesse à l'évolution du climat

5.4.2.1. INTRODUCTION

Dans le cadre de démarche d'aide à la décision proposée pour l'écoconception de maisons à énergie positive, cette section étudie la problématique liée à la longue durée de vie des bâtiments au regard de l'évolution annoncée et déjà en cours du climat. Parmi les conséquences du dérèglement climatique figurent en effet une hausse des températures d'un à plusieurs degrés Celsius (selon les politiques de réduction des émissions de GES qui seront mises en place) et l'apparition plus fréquente, marquée et durable d'épisodes caniculaires. Or ces phénomènes affectent la performance des bâtiments, comme par exemple les besoins de chauffage et de climatisation des bâtiments, mais aussi le confort thermique des occupants. La double-question posée dans cette section peut ainsi être formulée de la façon suivante :

- Dans quelle mesure le changement climatique peut-il affecter, sur son cycle de vie, la performance prévue d'une maison à énergie positive ?
- Est-ce que cette modification de la performance est de nature à remettre en question les choix effectués en conception ?

Plus concrètement, les outils de simulation thermique dynamique des bâtiments utilisent des fichiers météorologiques au pas de temps horaire, représentatifs de séries longues observées dans le passé. Par exemple, les données météorologiques conventionnelles de la RT 2012 ont été générées sur la base des observations des années 1994 à 2008, selon la norme NF-EN-ISO 15927-477⁸² imposant *a minima* une décennie de relevés, et proposant une procédure établie sur la reconnaissance de mois « types ». Pour évaluer les impacts environnementaux du bâtiment, les outils d'ACV exploitent les résultats de la simulation thermique dynamique en considérant les mêmes performances pour chaque année du cycle de vie, et égales à celles simulées pour des conditions météorologiques proches du climat présent. Or, si le climat est amené à fortement évoluer, cette hypothèse ne permet pas d'intégrer les effets à moyen et long termes, et pourrait donc fausser partiellement les décisions prises lors du processus de conception. Cette approche peut conduire par exemple, en cas de réchauffement climatique, à donner trop d'importance aux besoins de chauffage et à sous-estimer la problématique du confort estival.

Dans ce contexte, nous proposons de mettre en œuvre une approche prospective pour évaluer, selon différents scénarios d'évolution du climat, les

⁸² Performance hygrothermique des bâtiments, Calcul et présentation des données climatiques, Données horaires pour l'évaluation du besoin énergétique annuel de chauffage et de refroidissement

- Pour les données futures, seule une évolution de la température est considérée, le rayonnement solaire est, quant à lui, inchangé
- L'évolution de la température d'eau froide est négligée.
- La modification du rendement des panneaux solaires avec l'augmentation de la température d'air extérieur est négligée.
- Le mix énergétique est considéré fixe sur tout le cycle de vie.

L'étude de cas considérée ne présentant pas de système de climatisation, la démarche proposée se focalisera sur les impacts d'une hausse de la température extérieure sur les besoins de chauffage du bâtiment, et notamment sur les émissions de GES qui en découlent.

❖ Modélisation horaire des données météorologiques futures

Pour simuler le comportement thermique du projet étudié dans ces travaux avec un climat futur, il est nécessaire de produire d'un fichier météorologique au pas de temps horaire. Deux approches sont possibles (Roux 2016) :

- Utiliser des modèles de projections climatiques complexes permettant de créer des séries longues, et reconstruire, à partir de la série longue obtenue, une année type.
- Appliquer des techniques de « *morphing* » à une météorologie type actuelle pour la modéliser avec des caractéristiques de la météorologie future.

Si la première approche est la plus complète (p. ex. prise en compte de la variabilité interannuelle), il est difficile d'avoir accès à de telles séries longues, et correspondant à la station souhaitée (Trappes dans notre cas). Pour ces raisons, nous avons retenu l'approche par « *morphing* », et développons ci-après la technique la plus couramment utilisée pour produire des données météorologiques pour la simulation thermique des bâtiments, à savoir celle issue des travaux de Belcher et al. (2005). Cette technique propose trois types de transformation :

- la translation ;
- l'étirement linéaire ;
- et une combinaison de ces deux transformations.

La **translation** consiste en un décalage des données pour les ajuster à la moyenne mensuelle future projetée, pouvant être illustrée par la relation :

$$x = x_0 + \Delta x_m \quad (5.4)$$

avec : Δx_m la variation absolue de la moyenne mensuelle de la variable x pour le mois m . L'**étirement linéaire** consiste en la multiplication des données par un facteur correctif :

$$x = x_0 \times \alpha_m \quad (5.5)$$

avec : α_m le changement fractionnel de la moyenne mensuelle pour le mois m . Le calcul de ce facteur correctif pour la température d'air se réalise par le rapport des écarts entre moyenne des températures maximales journalières ($\overline{T_{pmax}}$

pour le présent et $\overline{T_{fmax}}$ pour le futur) et la moyenne des températures minimales journalières ($\overline{T_{pmin}}$ pour le présent et $\overline{T_{fmin}}$ pour le futur) pour le mois considéré, dont l'expression est donnée par la relation (5.6) :

$$\alpha_m = \frac{\overline{T_{fmax}} - \overline{T_{fmin}}}{\overline{T_{pmax}} - \overline{T_{pmin}}} \quad (5.6)$$

Une combinaison de transformation et d'étirement linéaire peut ainsi s'écrire sous la forme de l'expression suivante :

$$x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m \times (x_0 - \langle x_0 \rangle_m) \quad (5.7)$$

avec : $\langle x_0 \rangle_m$ la moyenne mensuelle de la variable initiale.

Comme présenté Figure 5-43, des données de température sont disponibles sur le site de la DRIAS⁸³ pour les scénarios RCP 2,6, RCP 4,5, et RCP 8,5 et pour trois horizons temporels : proche (2021-2050), moyen (2041-2070) et lointain (2071-2100).

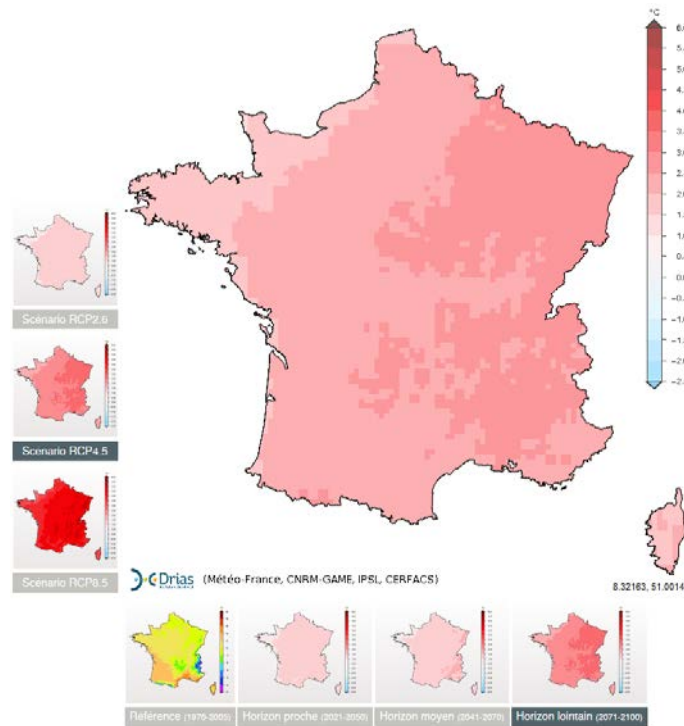


Figure 5-43. Anomalie de température moyenne quotidienne (écart entre la période considérée et la période de référence). Expérience Météo-France/CRNM2014 avec le modèle Aladin. Exemple de résultats en horizon lointain (2071-2100) pour le scénario RCP 4,5, source DRIAS

⁸³ <http://drias-climat.fr/decouverte/parcours/neo/vignettes/temperature>

❖ Démarche proposée

Pour apporter des éléments de réponse à la problématique posée, nous proposons, dans le même esprit que l'étude précédente, de comparer les résultats d'un même processus d'optimisation, répété avec quatre fichiers météorologiques différents :

- le fichier conventionnel de la RT2005 pour la station de Trappes ;
- le fichier conventionnel de la RT2012 pour la station de Trappes ;
- le fichier conventionnel de la RT2012 pour la station de Trappes, transformé par « *morphing* » à l'aide de données du site de la DRIAS pour correspondre à des données météorologiques à l'horizon lointain (2071-2100) et pour le scénario RCP4,5 du GIEC ;
- le fichier conventionnel de la RT2012 pour la station de Trappes, transformé par « *morphing* » à l'aide de données du site de la DRIAS pour correspondre à des données météorologiques à l'horizon lointain (2071-2100) et pour le scénario RCP8,5 du GIEC.

Pour faciliter la description des résultats, ces scénarios seront dans la suite du document appelés « RT2005 », « RT2012 », « RCP 4,5 » et « RCP 8,5 ». Dans chaque cas, les scénarios météorologiques seront utilisés pour l'ensemble de la durée de vie du bâtiment. Ceci permet d'encadrer les résultats entre la non prise en compte du réchauffement climatique (données RT 1005) et l'hypothèse la plus haute (RCP 85).

❖ Analyse des fichiers météorologiques produits

Avant de présenter les résultats obtenus, il est essentiel d'analyser les principales caractéristiques des fichiers météorologiques étudiés, de manière à disposer des clés de compréhension pour l'interprétation des résultats.

La Figure 5-44 présente, sous forme de boîtes à moustaches, les résumés statistiques standards (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile, maximum) pour les données de température des quatre fichiers météorologiques. Si elle n'est pas affichée, la moyenne est proche de la médiane, quoique légèrement supérieure (RT2005 : 11,1 °C, RT2012 : 12,0 °C, RCP 4,5 : 13,0 °C ; et RCP 8,5 : 14,4 °C). Outre la hausse cohérente de tous les résumés statistiques dans ce même ordre de suivi des scénarios, il peut également être noté que, globalement, la médiane s'éloigne du troisième quartile pour se rapprocher du premier quartile, de même qu'elle se rapproche du minimum. Cela traduit une augmentation plus prononcée des températures élevées que basses.

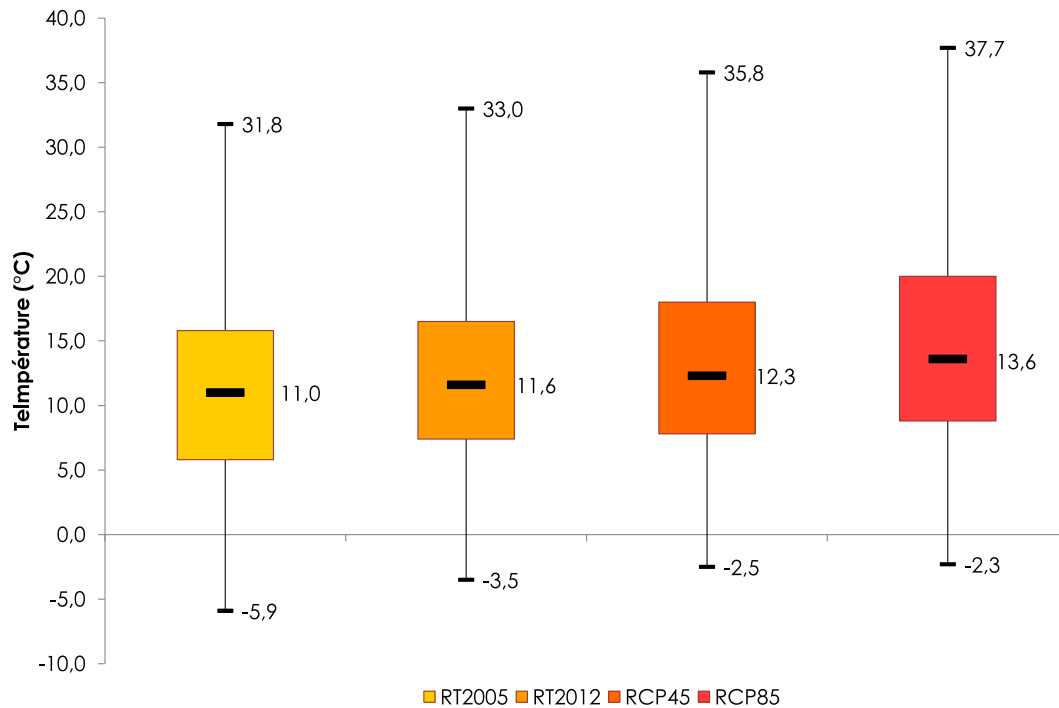


Figure 5-44. Boîtes à moustaches des séries temporelles de température d'air extérieur pour les quatre fichiers météorologiques étudiés

La Figure 5-45 permet d'illustrer plus précisément cette remarque, en présentant les températures moyennes selon les quatre saisons. Il peut effectivement être observé que l'écart été-hiver entre les fichiers RCP 8,5 et RT2005 est passé de 12,5 °C à 15,3 °C en moyenne. Notons aussi qu'entre les fichiers RT2005 et RT2012, la température moyenne en hiver augmente de plus d'un degré et demi (1,6 °C) alors que cette hausse n'est que de 0,3 °C en été. Cette tendance est contraire à celles observées sur les scénarios RCP 4,5 et RCP 8,5 construits par « morphing » à partir de données de la DRIAS, où la température moyenne s'élève de manière plus prononcée en été qu'en hiver par rapport au fichier RT2012.

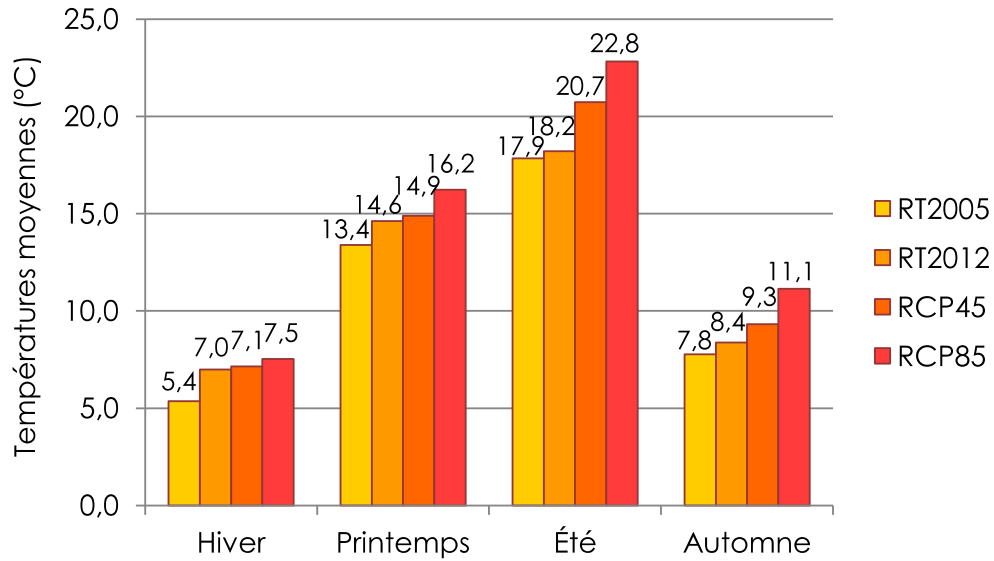


Figure 5-45. Températures moyennes par saison pour les quatre fichiers météorologiques étudiés

Le Tableau 5-11 présente les températures du sol considérées par les deux fichiers réglementaires (RT2005 et RT2012), et les deux fichiers obtenus par « *morphing* ». Une différence marquée est observable entre les deux fichiers conventionnels.

Tableau 5-11 : Températures du sol pour les quatre fichiers météorologiques étudiés

Fichiers météorologiques	RT2005	RT2012	RCP 4,5	RCP 8,5
Température du sol (°C)	10	14	15	16

La deuxième différence majeure entre ces deux fichiers concerne le rayonnement global horizontal moyen sur l'année (Figure 5-46). Une augmentation d'environ 10 % est observable, faisant suite à une vraisemblable sous-estimation dans le fichier RT2005. Cette figure permet finalement de rappeler que pour les scénarios RCP 4,5 et RCP 8,5, seule une évolution de la température extérieure a été modélisée, le rayonnement solaire étant quant à lui identique à celui du fichier RT2012.

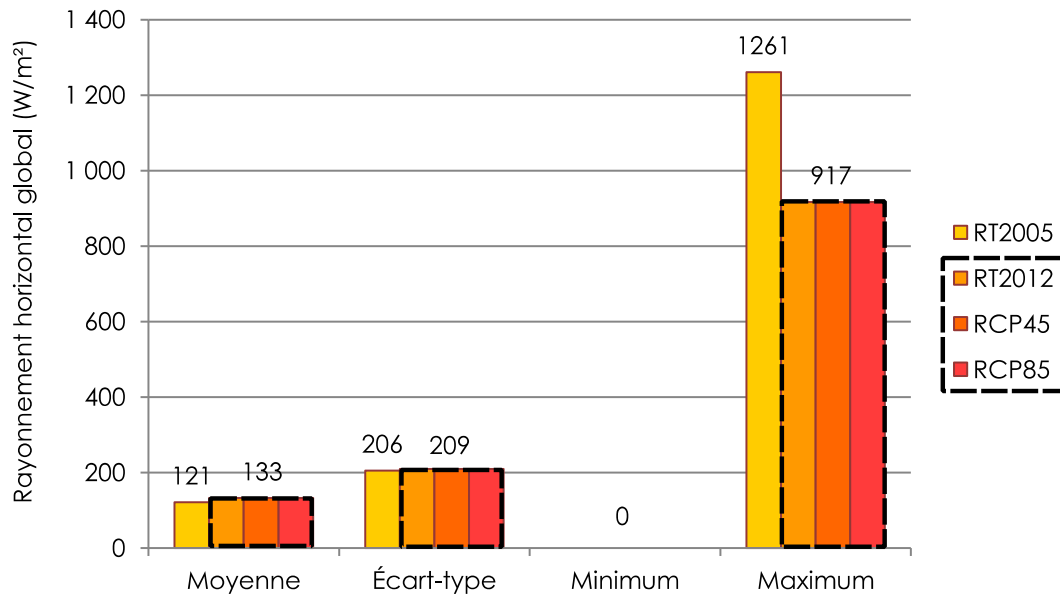


Figure 5-46. Description statistique du rayonnement global horizontal pour les quatre fichiers météorologiques étudiés (données RCP45 et RCP85 identiques à celles de RT2012)

5.4.2.3. RÉSULTATS

❖ Fronts de Pareto approchés associés aux fichiers météorologiques

La Figure 5-47 permet d'apprécier l'ordre de grandeur des écarts générés en matière d'émissions de GES selon chaque fichier météorologique. Il peut être estimé à 15 % entre le fichier RT2005 et le fichier RCP 8,5. À titre de comparaison, ces écarts sont plus resserrés que ceux observés lors des optimisations réalisées avec différents types de ménage. Cela s'explique majoritairement par le fait qu'ici, seuls les besoins de chauffage varient (avec les sollicitations de température extérieure) alors que dans l'étude précédente, le changement d'occupants impliquait également des variations sur les apports internes (chaleur métabolique et puissance dissipée par les appareils électriques) et les besoins énergétiques en ECS.

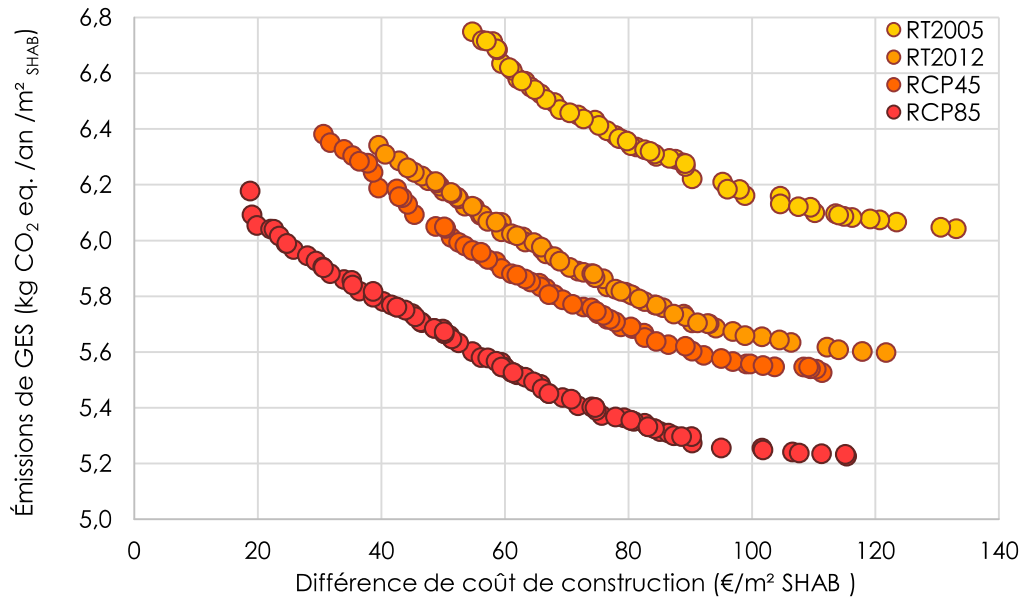


Figure 5-47. Fronts de Pareto approchés pour les quatre fichiers météorologiques étudiés

❖ Caractéristiques des fronts de Pareto présentés

Outre ces différences évidentes en valeurs absolues, il convient surtout d'analyser si les choix effectués en conception peuvent être remis en question. À ce titre, nous présentons ci-après, les caractéristiques des fronts approchés correspondant aux quatre fichiers météorologiques en matière :

- d'épaisseur de laine de verre dans les murs (Figure 5-48) ;
- d'épaisseur des hourdis en polystyrène dans le plancher bas (Figure 5-49) ;
- d'épaisseur de laine de verre dans la toiture (Figure 5-50) ;
- d'installation de menuiseries en triple-vitrage sur la façade nord-est (Figure 5-51) ;
- d'installation d'une VMC double-flux (Figure 5-52) ;
- et d'installation d'un récupérateur de chaleur sur eaux grises (Figure 5-53).

Avant de commenter ces figures, rappelons que ces résultats sont issus d'un processus d'optimisation stochastique, sans garantie de convergence complète vers les résultats optimaux du problème. Néanmoins, le calcul du front de Pareto optimal dans la phase de conception détaillée (section 5.3.2) et l'étude sur le paramétrage de l'algorithme (partie 5.5) permettent de penser que les résultats obtenus correspondent à une approximation de haute qualité.

Concernant l'isolation de la maison, des choix de conception relativement différents sont observables selon le fichier météorologique utilisé. Globalement, plus la température moyenne est clémente, plus les épaisseurs d'isolation sont faibles, ce qui est tout à fait logique. Des écarts assez importants peuvent être notés. Par exemple, 75 % des individus du front associé au fichier RCP 8,5

présentent une épaisseur de laine de verre dans les murs inférieure ou égale à 21 cm, tandis que pour le front associé au fichier RT2005, 66 % des individus disposent de 24 cm ou plus d'isolation, dont 36 cm dans 8 % des cas⁸⁴. Cette tendance générale peut également être illustrée pour l'isolation du plancher bas, et dans une moindre mesure, pour l'isolation de la toiture. Selon le climat, les compromis identifiés en conception peuvent donc changer de manière assez substantielle.

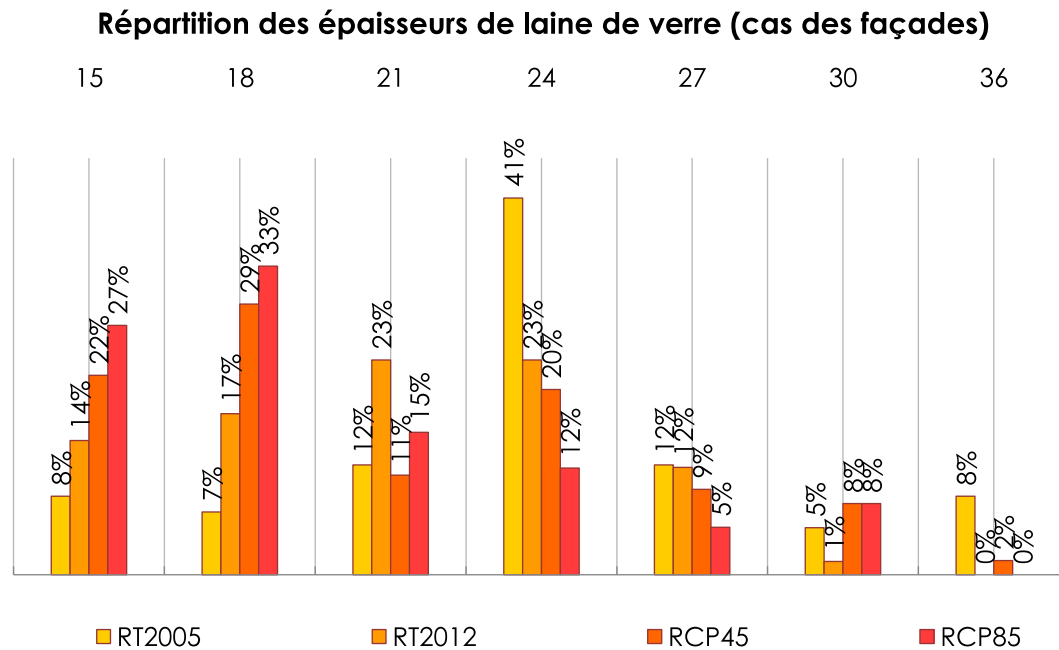


Figure 5-48. Influence du climat sur l'isolation des façades pour les solutions du front de Pareto approché

⁸⁴ Rappelons qu'un complément d'isolation de 8 cm de laine de bois est déjà inclus dans l'isolation des murs et de la toiture.

Répartition des épaisseurs des hourdis en polystyrène (cas du plancher bas)

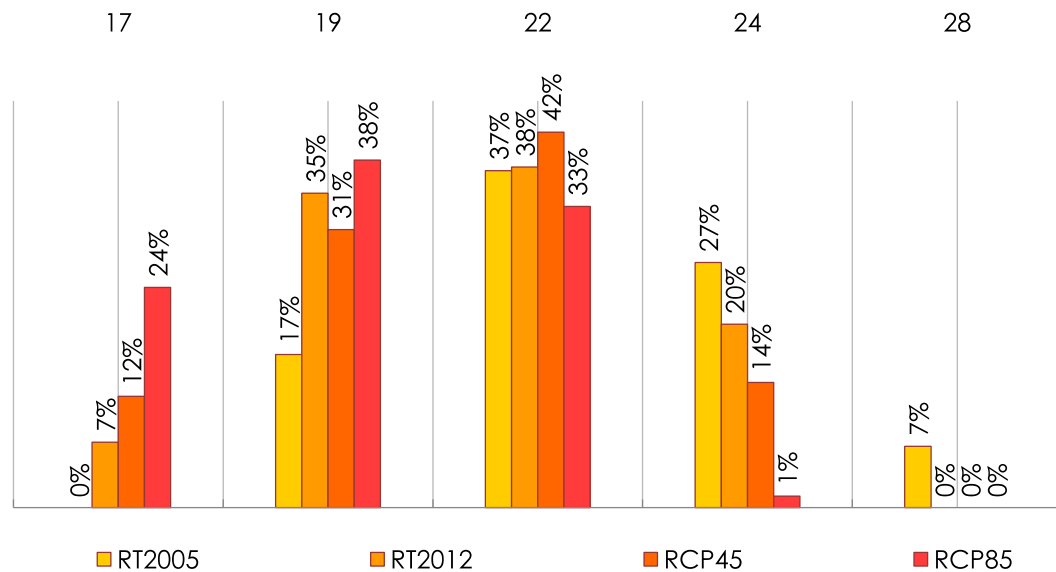


Figure 5-49. Influence du climat sur les épaisseurs des hourdis en polystyrène des façades pour les solutions du front de Pareto approché

Répartition des épaisseurs de laine de verre (cas de la toiture)

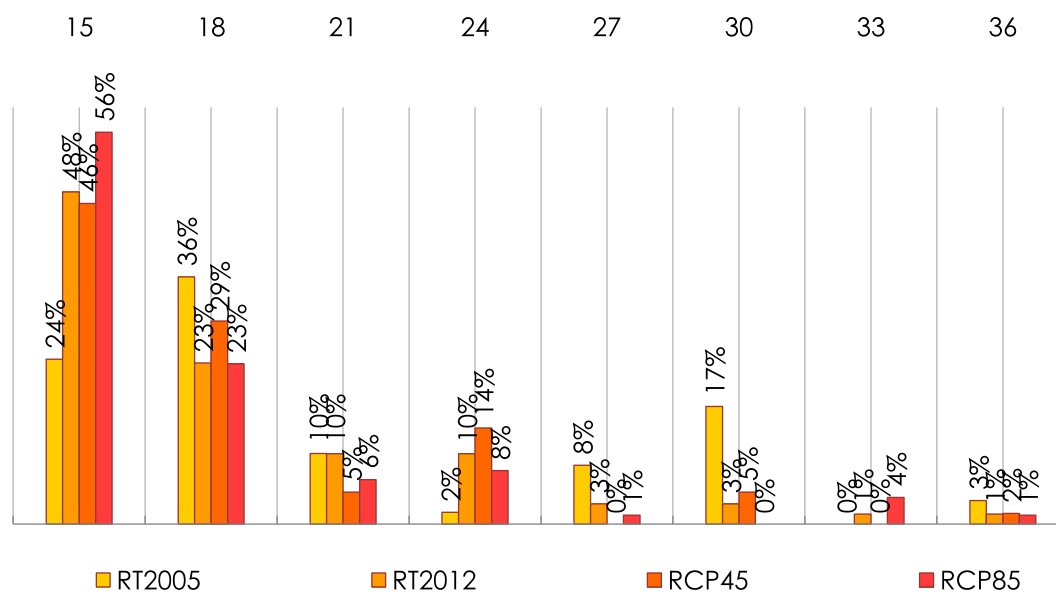


Figure 5-50. Influence du climat sur les épaisseurs de laine de verre en toiture pour les solutions du front de Pareto approché

À l'inverse de l'isolation, les résultats concernant la mise en œuvre de menuiseries à triple-vitrage sur la façade nord-est sont inchangés selon le fichier météorologique utilisé. Les 1 ou 2 % d'écarts n'étant pas significatifs, au vu du caractère approché des résultats. L'explication principale provient du fait que le

surcoût considéré d'un triple-vitrage est relativement faible par rapport au coût d'un double vitrage, et que le triple-vitrage permet une meilleure isolation du froid (comme du chaud) des menuiseries, éléments souvent charnières des enveloppes performantes.

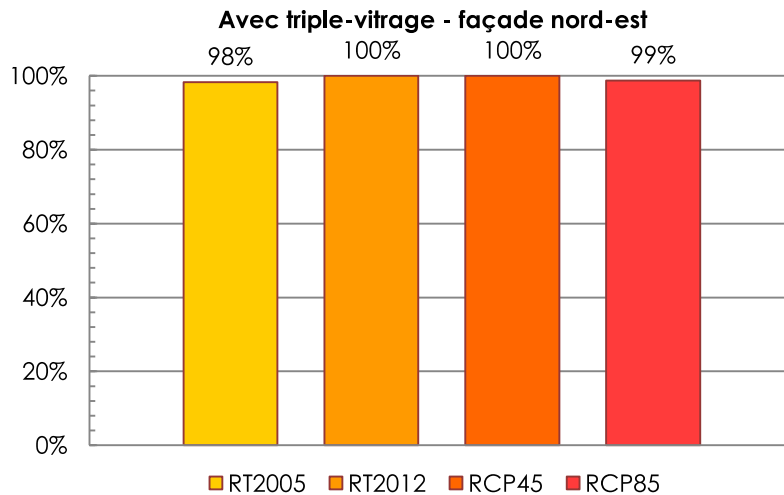


Figure 5-51. Influence du climat sur le type de vitrage sur la façade nord-est pour les solutions du front de Pareto approché

Concernant l'installation d'une VMC double-flux, il peut être observé l'apparition de compromis dans les scénarios RCP 4,5 et RCP 8,5, alors qu'il y avait l'existence de solutions privilégiées avec les fichiers météorologiques réglementaires. En effet, si avec ces fichiers, l'installation d'une VMC double-flux était nécessaire pour qu'une solution ne soit pas dominée au sens du problème d'optimisation formulé, il devient possible, avec les scénarios RCP 4,5 et RCP 8,5, de trouver des solutions non-dominés pour lesquelles une VMC simple-flux est installée. Ce résultat semble cohérent avec le fait que l'intérêt de récupérer les calories sur l'air vicié diminue à mesure que les besoins de chauffage se réduisent avec une température extérieure plus élevée.

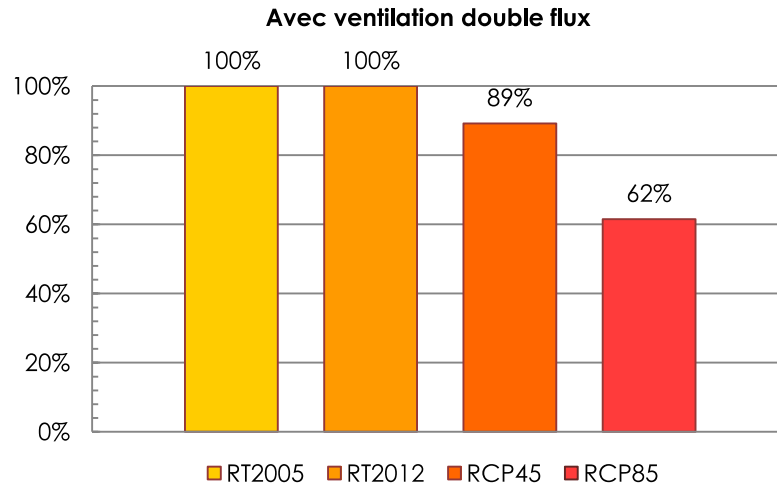


Figure 5-52. Influence du climat sur le type de ventilation pour les solutions du front de Pareto approché

Enfin, présentons les caractéristiques des fronts à propos de la mise en place d'un système de récupération de chaleur sur eaux grises. Pour cet équipement, les compromis apparaissent pratiquement inchangés entre les fichiers météorologiques, ce qui s'explique par le fait que ni les scénarios de puisage d'ECS ni la température d'eau froide n'a été modifiée. Pour le fichier RT2005, il est cependant observable qu'une proportion légèrement supérieure de concepts semble inclure ce système. Si cette différence devait être considérée comme significative, l'interprétation pourrait être que, par rapport aux besoins de chauffage élevés associés à ce climat, ce système devienne plus efficient que d'autres choix de conception, au sens du potentiel de diminution des émissions de GES par rapport au coût d'investissement. En effet, pour ce fichier météorologique, il convient d'isoler davantage pour respecter la contrainte d'énergie positive. Or pour des niveaux élevés d'isolation, l'ajout de centimètres supplémentaires d'isolation ne permet que des gains marginaux en matière de réduction des besoins de chauffage, mais coûte toujours autant.

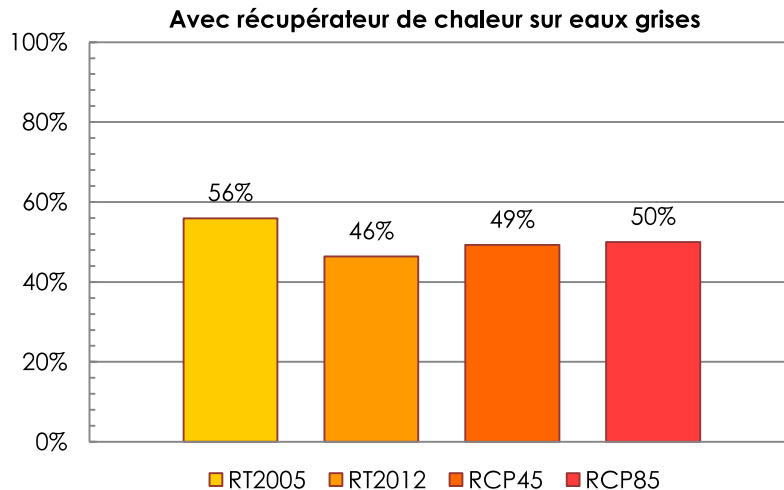


Figure 5-53. Influence du climat sur l'installation d'un récupérateur de chaleur sur eaux grises pour les solutions du front de Pareto approché

❖ Confort thermique

Dans la partie 1.4, nous avons indiqué le fait que le critère de confort thermique retenu dans ces travaux n'est pas directement intégré dans la formulation du problème d'optimisation, mais qu'une vérification *a posteriori* des meilleurs concepts était faite pour s'assurer de leur acceptabilité. Néanmoins, dans cette étude, il semble tout à fait pertinent d'analyser les impacts d'une élévation de la température extérieure sur le confort thermique des concepts issus de l'optimisation⁸⁵. La Figure 5-54 présente sous la forme de boîtes à moustaches, les résumés statistiques classiques (minimum, premier quartile, médiane, troisième quartile, et maximum). Une augmentation significative de l'inconfort thermique peut être soulignée. En effet, à chaque changement de fichier météorologique, le maximum obtenu pour le précédent devient approximativement le minimum pour le suivant. Par exemple, le maximum du fichier RT2012 et le minimum du fichier RCP 4,5 se situent autour de 3 %. Pour le fichier RCP 8,5, le maximum est de 9 %, ce qui est conséquent. En effet, si la durée annuelle d'occupation de la maison est de 11 mois, alors ce résultat peut être traduit, au sens de cet indicateur, par une durée d'inconfort thermique d'un mois sur l'année. Bien évidemment, l'observation faite sur cette figure doit être complétée par d'autres études. Le confort est effectivement une notion complexe à quantifier où l'analyse croisée de plusieurs indicateurs peut s'avérer particulièrement utile pour disposer d'une vision globale. Par exemple, le taux d'inconfort ne traduit pas l'intensité de l'inconfort perçu. Que la température

⁸⁵ Comme le taux d'inconfort thermique global n'était pas directement intégré dans le processus d'optimisation, il n'était pas automatiquement calculé pour les individus des fronts de Pareto approchés finaux. Néanmoins, il pouvait l'être pour les enfants. Or, à la fin du processus, lorsque l'algorithme converge, les enfants présentent des génotypes fortement similaires voire identiques à ceux des individus de la population courante. Aussi, ils peuvent être utilisés, en première approximation, pour estimer le taux d'inconfort global des fronts de Pareto approchés.

intérieure à une heure donnée soit de 27,1 °C ou de 35 °C le calcul sera en effet identique. Il faut également mettre en perspectives ce résultat par rapport aux scénarios de surventilation naturelle nocturne et d'occultation déjà mis en place dans la modélisation du projet, et à la puissance plutôt modérée dégagée par les appareils électroménagers. Même les résultats sont à interpréter avec prudence, il semblerait qu'un rafraîchissement actif (typiquement un système de climatisation) puisse être massivement utilisé en France à la fin du siècle, notamment en l'absence de politique efficace en matière de réduction des émissions de GES.

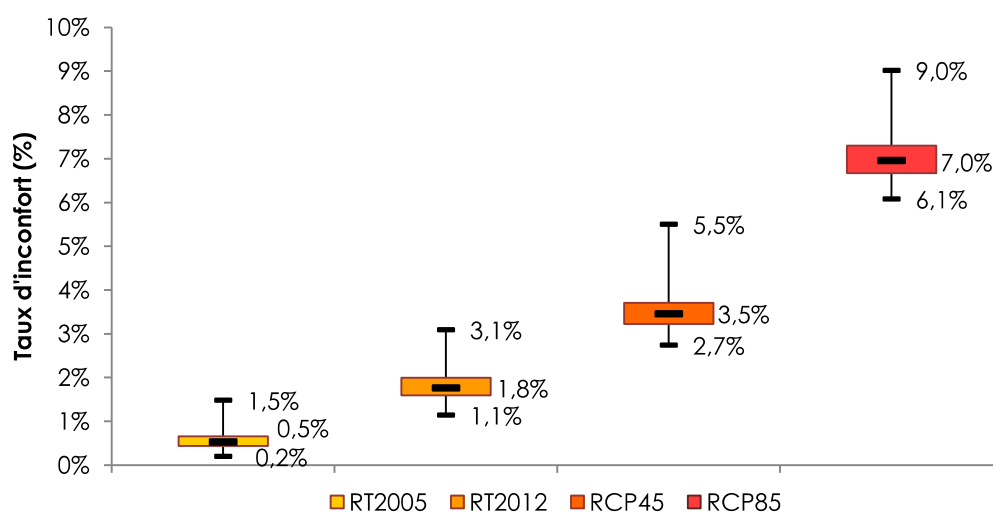


Figure 5-54. Boîtes à moustaches du taux d'inconfort global des cinq dernières générations d'enfants en fonction du fichier météorologique

5.4.2.4. CONCLUSION

L'étude sur le changement climatique prévu jusqu'à la fin XXI^{ème} siècle a nécessité la création de fichiers météorologiques prospectifs, au pas de temps horaire pour la station de Trappes. Ils ont été exploités pour estimer et comparer la performance, en matière d'émissions de GES, d'une maison à énergie positive sur tout son cycle de vie. L'une des principales hypothèses a été de considérer le même fichier météorologique annuel sur l'ensemble de la durée d'utilisation du bâtiment. Malgré l'aspect simplificateur de cette hypothèse pour l'instant utilisée dans les outils d'ACV bâtiments, la modélisation correspondante permet d'encadrer les résultats entre des approches extrêmes. Sur l'étude de cas considérée, il a par exemple été montré que les écarts maximaux de performance (pour les émissions de GES) étaient de l'ordre de 15 % (Figure 5-47), et que les choix en conception de certaines variables pouvaient être significativement impactés (cas des épaisseurs d'isolation ou de la mise en place d'une VMC double-flux) alors que d'autres sont apparus robustes au changement de profil de la température extérieure (cas du triple-vitrage sur la

façade nord-est). L'effet sur le confort thermique est important, ce qui justifierait des travaux complémentaires. La non-prise en compte de plusieurs effets du changement climatique (évolution de la température d'eau froide, modification du rendement des panneaux photovoltaïques, etc.) a vraisemblablement réduit quelque peu l'amplitude des écarts observés et a, pour certaines variables de conception, rendu leur analyse caduque (cas de l'installation du récupérateur de chaleur sur eaux grises). De même, les résultats restent conditionnés de manière considérable à des hypothèses majeures faites en ACV, comme par exemple le mix de production électrique utilisé. Or, la transition vers les ENR pourrait fondamentalement modifier les émissions de GES (ainsi que les autres impacts environnementaux) résultant des différentes consommations énergétiques. En définitive, cette étude a permis d'explorer une démarche originale, en association optimisation multicritère et fichiers météorologiques prospectifs pour évaluer le risque de non-robustesse d'une décision vis-à-vis du changement climatique prévu jusqu'à la fin du siècle. Tout comme l'étude précédente, l'intérêt et la faisabilité de cette approche semblent avoir été montrés sur l'étude de cas sur laquelle elle a été appliquée. Néanmoins, des travaux d'approfondissements sont nécessaires pour renforcer ces conclusions.

5.4.3. Conclusion sur l'étude de la robustesse

Grâce à l'application de méthodologies originales, cette partie a permis de prendre un peu de plus de recul sur les résultats d'optimisation obtenus dans la partie précédente. En effet, si la démarche d'écoconception mise en œuvre précédemment dans ces travaux a permis de progresser vers une aide à la décision plus pertinente (en intégrant une approche multicritère et multiétape dans l'étude du système bâtiment), les démarches explorées dans cette partie correspondent certainement au pallier suivant de réponses à cet objectif d'améliorer le processus de conception des bâtiments. Elles correspondent à une étape intermédiaire entre optimisation classique et optimisation robuste, où les incertitudes sur le système étudié et/ou les évolutions du contexte (p. ex. mix électrique) seraient prises en compte à l'intérieur même du processus d'optimisation. Une évaluation *a posteriori* du degré de robustesse des solutions optimisées est de cette manière rendue possible en des temps de calculs abordables (2-3 h par cas étudié), ce qui constitue pour l'instant le verrou majeur à l'utilisation de l'optimisation robuste en phase de conception des bâtiments. Une étude de sensibilité des solutions optimales à l'occupation et au climat a mis en évidence la potentielle difficulté d'obtenir des données, et l'enjeu majeur de la qualité de ces données. Le calibrage sur des statistiques socio-démographiques d'un modèle stochastique d'occupation ou la génération de scénarios climatiques prospectifs reposent en effet en grande partie sur la qualité

des données. Un parallèle évident avec les analyses de sensibilité et d'incertitude peut à ce sujet être évoqué, et trouve par exemple un écho avec des travaux en cours pour fiabiliser les résultats d'ACV (Pannier et al. 2016b).

5.5. RÉSULTATS DU PARAMÉTRAGE

Outre l'application de la démarche proposée à une étude de cas (partie 5.2) et l'interprétation physique des résultats associés, les parties 5.3 et 5.4 ont également été l'occasion d'apprécier, et valider l'un des aspects de la performance de l'algorithme NSGA-II, à savoir la qualité des solutions obtenues. Dans cette étude de cas, le front de Pareto approché a effectivement convergé efficacement vers le front optimal, le recouvrant en très grande partie à la fin du processus d'optimisation.

Cette partie est consacrée à la performance de cet algorithme, liée à son paramétrage, notamment en intégrant les aspects de vitesse d'exécution et de robustesse développés dans le chapitre 3. Si certaines informations sont rappelées au fil de cette partie, le lecteur pourra retrouver, dans la partie 3.3 du chapitre 3, l'ensemble des éléments méthodologiques de la démarche mise en œuvre.

5.5.1. Étude préliminaire

L'étude préliminaire a pour but d'établir l'importance du paramétrage concernant : la taille de la population, le taux de mutation et le taux de croisement. De plus, afin de faciliter la lecture des figures, les variantes sont nommées par la convention suivante : PXYCZ avec X la taille de la population, Y le taux de mutation et Z le taux de croisement. Dans cette étude préliminaire, une comparaison entre cinq variantes de l'algorithme NSGA-II a été réalisée, rappelées ci-dessous :

- une variante de référence **P200M15C80**, correspondant à la variante utilisée avant cette étude, et dont les valeurs se basent pour partie sur la littérature ;
- deux variantes modifiant les taux de mutation et de croisement, à savoir :
- la variante **P200M0C100**, tendant à représenter une variante favorisant, avec un taux de croisement maximal et un taux de mutation nul, plutôt l'intensification à la diversification de la recherche (même si le croisement permet également d'apporter une certaine diversité génétique) ;
- la variante **P200M100C0**, tendant à représenter une variante menant, avec un taux de croisement nul et un taux de mutation maximal, une exploration proche d'une recherche aléatoire pure ;

- et deux variantes agissant sur la taille de la population, à savoir :
- la variante **P2000M15C80**, tendant à représenter une variante favorisant, avec une taille de population élevée, la diversité de la population au détriment sa convergence ;
- la variante **P20M15C80**, tendant à représenter une variante favorisant, avec une taille de population basse, la convergence de la population par rapport à la diversité.

L'influence des valeurs des paramètres quantitatifs sur les performances de l'algorithme est évaluée en comparant la qualité des solutions à budget constant d'évaluations, fixé à 6 000 évaluations (sans prendre en compte les évaluations des individus de la population initiale). La taille de la population faisant partie des paramètres quantitatifs à optimiser, elle détermine le nombre de générations permettant d'obtenir les 6 000 évaluations.

Tableau 5-12 : Valeurs des paramètres quantitatifs utilisées dans l'étude préliminaire

Paramètres	Variantes				
	Référence (P200M15C80)	P2000M15C80	P20M15C80	P200M0C100	P200M100C0
Taille de la population	200	2000	20	200	200
Taux de mutation	0,15	0,15	0,15	0	1
Taux de croisement	0,8	0,8	0,8	1	0
Nombre de générations	30	3	300	30	30

Dans l'optique d'étudier et comparer ces cinq variantes, quatre indicateurs sont calculés dans cette étude :

- l'hypervolume ;
- les taux d'amélioration et de consolidation ;
- le taux de doublons.

5.5.1.1. RÉSULTATS CONCERNANT L'HYPERVOLUME

L'hypervolume est une mesure combinée de la convergence et de la diversité d'un ensemble de solutions non-dominées. Pour suivre la qualité des solutions obtenues par les cinq variantes étudiées, la valeur de l'hypervolume du front de Pareto approché de chaque variante a été calculée pour toutes générations associées, en prenant comme point de référence, le point Nadir du front de Pareto optimal. La Figure 5-55 montre l'évolution de ces valeurs

d'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations. Pour apprécier la convergence des fronts approchés vers le front optimal, la valeur de l'hypervolume de ce dernier a également été calculée ; elle vaut 0,674 et est représentée par la droite horizontale en pointillés sur la Figure 5-55.

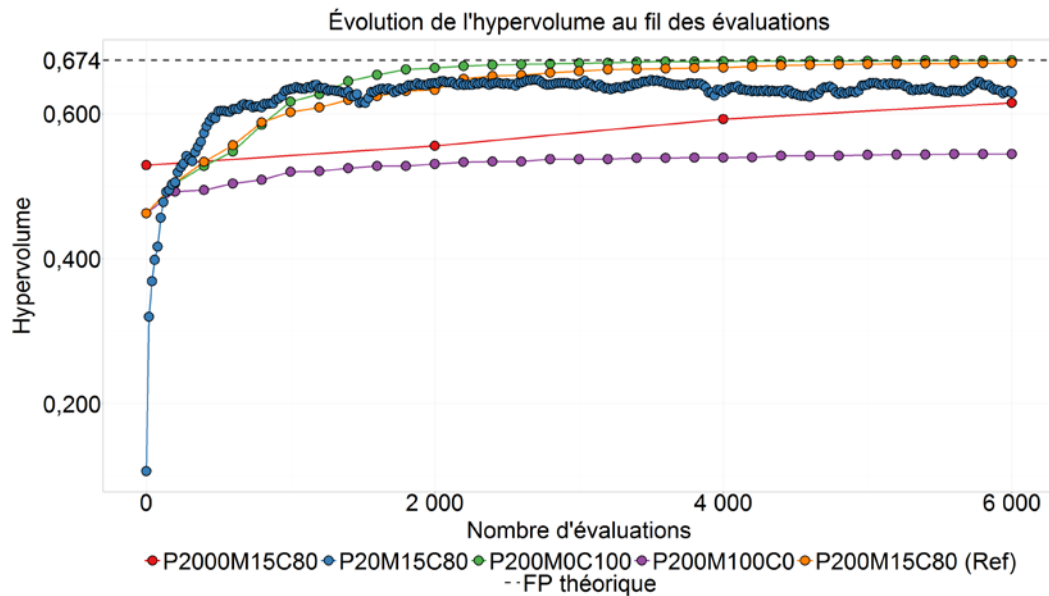


Figure 5-55. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations, pour toutes les variantes comparées lors de l'étude préliminaire

Excepté pour la variante à très grande taille de population, il peut être observé que, pour toutes les autres variantes, l'hypervolume présente globalement une croissance rapide pour les premières générations, et plus lente par la suite. Cette évolution est en lien direct avec la progression du front de Pareto approché vers le front de Pareto optimal, comme le montre la Figure 5-56 dans le cas de la variante de référence.

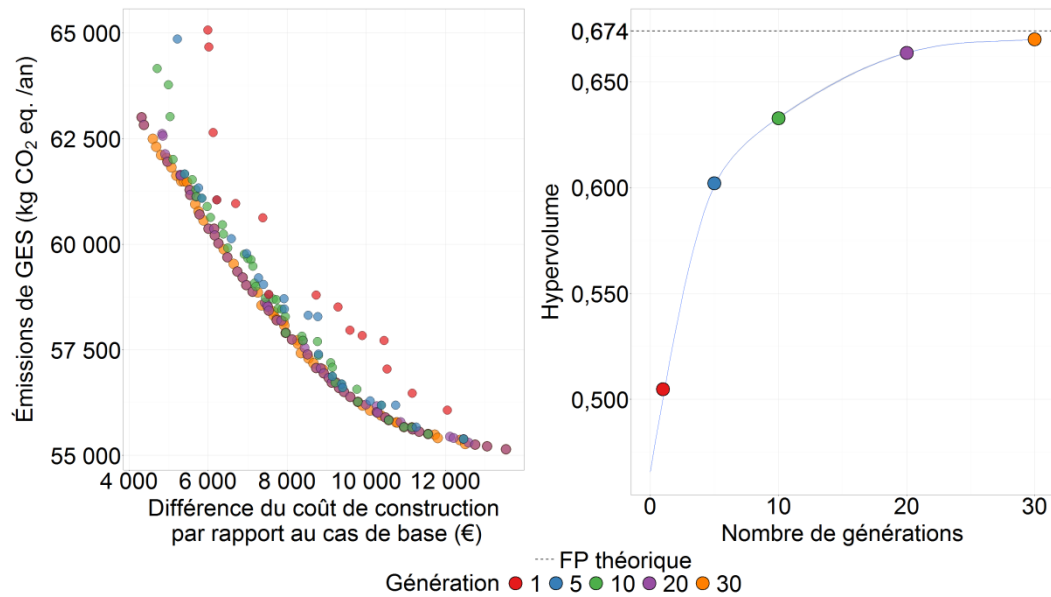


Figure 5-56. Évolutions du front de Pareto approché (gauche) et de la valeur de l'hypervolume associé à ce front (droite), cas de la variante de référence

La variante à taille très élevée de population (*P2000M15C80*) comporte seulement trois générations sur l'ensemble de l'étude, du fait du nombre fixé d'évaluations (6 000). Or l'évolution de la population s'effectuant à chaque génération par l'application des opérateurs de sélection et de variation peut être limitée avec un nombre aussi restreint de générations. C'est ce qui peut être observé concernant l'évolution de la valeur de l'hypervolume, avec une croissance lente et une valeur à 6 000 évaluations relativement éloignée de la valeur de l'hypervolume du front de Pareto optimal. Pour l'étude de cas considérée, ce réglage apparaît donc comme peu efficace.

À l'inverse, la variante à faible taille de population (*P20M15C80*) présente une augmentation rapide de l'hypervolume dès les premières générations. Le faible nombre d'individus par génération autorise en effet un nombre élevé d'itérations de l'algorithme, à l'origine de cette progression. En revanche, la principale limite de ce réglage réside dans le fait que cette petite taille de la population est ici inférieure à celle du front de Pareto optimal, comptant une centaine d'individus. Ainsi, le nombre réduit d'individus dans la population courante (20) ne permet pas de décrire de manière satisfaisante l'ensemble des compromis accessibles. Cela aboutit à un hypervolume présentant une valeur maximale au bout de 1 000 évaluations, et ne pouvant plus être améliorée par la suite. La stochasticité du processus génétique explique les oscillations observées à partir de 1 000 évaluations environ. Pour l'étude de cas considérée, ce réglage présente l'avantage de pouvoir identifier rapidement un ensemble réduit de solutions performantes, mais l'inconvénient de ne décrire que partiellement le front de Pareto optimal, à hauteur d'environ 20 % des solutions.

La variante *P200M0C100* présente un résultat très intéressant puisque la valeur de son hypervolume à 2 000 évaluations est déjà équivalente à celle de la référence à 6 000 évaluations. Pour l'étude de cas considérée, cette variante permet ainsi d'obtenir une qualité de solutions comparable à celle de la variante de référence, mais en trois fois moins d'évaluations. Ces résultats tendent à montrer que le réglage de référence aurait une tendance trop prononcée à favoriser la diversification de la recherche vis-à-vis de l'intensification. Un taux de mutation trop élevé peut en effet avoir pour conséquence de ralentir la convergence de l'algorithme vers la fin du processus. Suite à cette observation, il semble intéressant d'envisager une réduction du taux de mutation dans l'étape de paramétrage.

La variante *P200M100C0* s'apparente davantage à une recherche aléatoire pure qu'à une recherche basée sur l'évolution artificielle, même si le mécanisme d'élitisme garantit la conservation des meilleurs individus au cours des générations. Le taux de croisement étant nul, il n'y a effectivement pas d'intensification de la recherche autour de ces meilleurs individus. Au contraire, le taux de mutation étant maximal, chaque enfant est muté sur chacun de ses gènes, ce qui entraîne un phénotype *a priori* relativement éloigné du phénotype du parent dont il descend. Pour cette variante, la progression du front approché réside ainsi exclusivement dans la génération aléatoire de nouveaux individus, meilleurs que les individus courants. Le fait que ces individus soient tirés aléatoirement contribue à une évolution lente de l'hypervolume au cours des évaluations, expliquant la performance limitée de cette variante, et montrant par là même l'intérêt d'une exploration guidée par évolution artificielle (les quatre autres variantes présentent en effet de meilleures valeurs d'hypervolume dès quelques centaines d'évaluation). Signalons cependant que cette variante convergera à l'infini vers la valeur de l'hypervolume du front de Pareto optimal.

La comparaison de plusieurs variantes singulières a permis de mettre en évidence l'importance du paramétrage de l'algorithme NGSA-II dans notre contexte. En effet, des comportements assez différents ont pu être observés selon les variantes, car ces dernières ont été volontairement choisies avec des réglages extrêmes. Les interactions entre taux de mutation et de croisement ont pu être identifiées, en plus de l'influence de la taille de la population. L'un des résultats marquants est d'avoir trouvé une variante permettant, pour cette étude de cas, de réduire d'un facteur trois le nombre d'évaluations requises pour converger, de manière équivalente à la variante de référence, vers le front de Pareto optimal (noté par la suite « FP théorique »).

5.5.1.2. RÉSULTATS CONCERNANT LES TAUX D'AMÉLIORATION ET DE CONSOLIDATION

L'évolution des taux d'amélioration (T_A) et de consolidation (T_C) est présentée à la Figure 5-57 pour les variantes agissant sur les opérateurs de variation, et à la Figure 5-58. pour les variantes agissant sur la taille de la population.

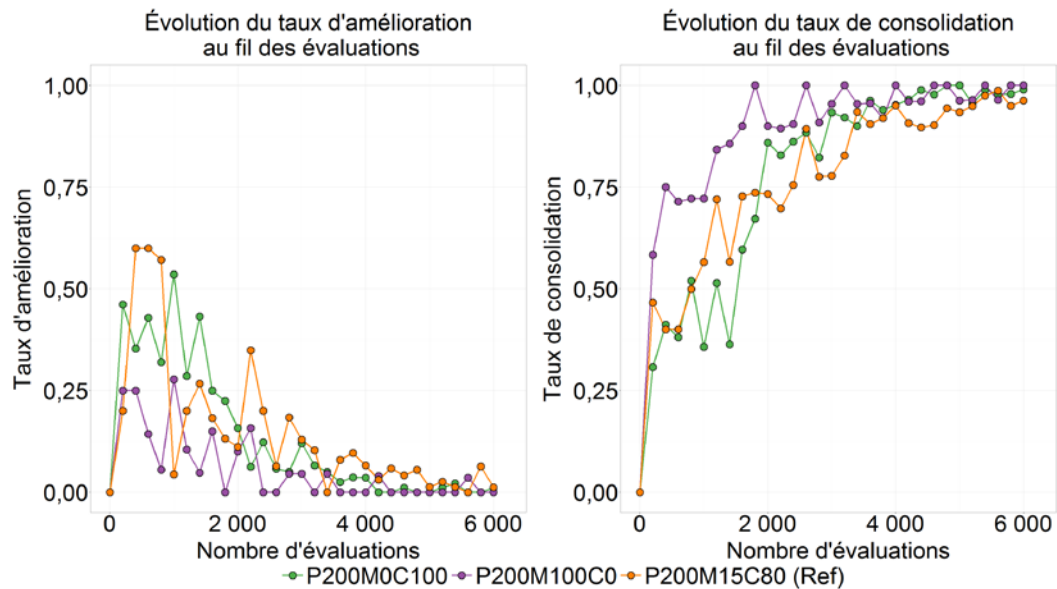


Figure 5-57. Évolution du taux de d'amélioration (à gauche) et du taux consolidation (à droite) au cours des évaluations pour les variantes P200M0C100, P200M100C0 et « Référence ».

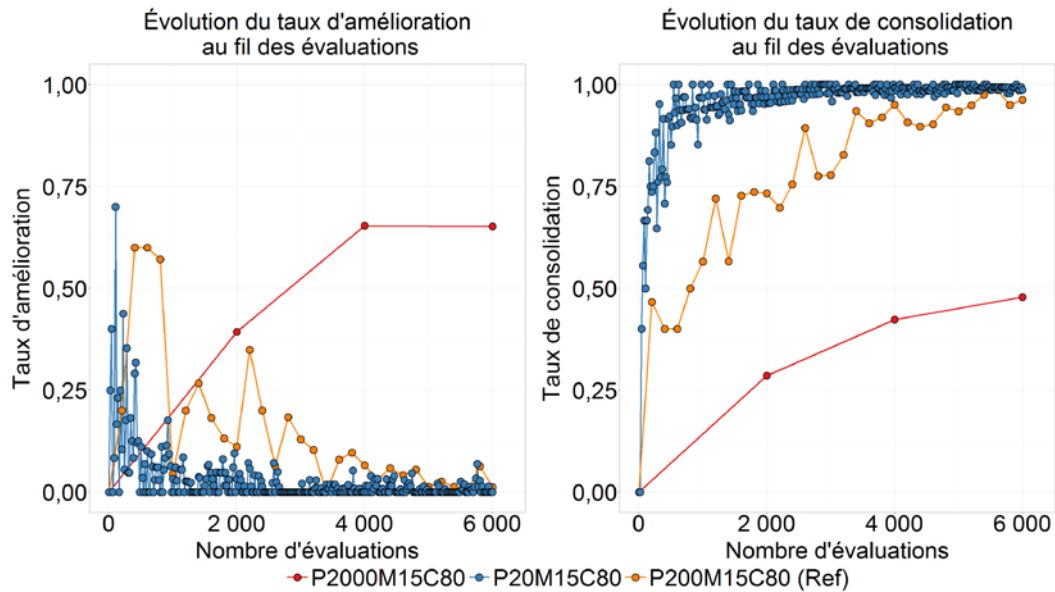


Figure 5-58. Évolution du taux de d'amélioration (à gauche) et du taux consolidation (à droite) au cours des évaluations pour les variantes P20M15C80, P2000M15C80 et « Référence ».

Le taux d'amélioration est bien plus élevé lors des premières générations que par la suite ; c'est en effet durant celles-ci qu'une majorité de nouvelles solutions non-dominées apparaissent. Ce taux diminue ensuite et présente de faibles variations à partir de 4 000 évaluations environ. Pour le taux de consolidation, son allure est proche de celle de l'hypervolume ci-avant analysé. Lors des premières générations, une forte proportion du front de Pareto courant est renouvelée, expliquant un taux de consolidation compris entre 0,25 et 0,75 environ (un quart à trois quarts des individus du front de Pareto à une génération donnée ne sont ainsi plus présents dans ce front à la génération suivante). Par la suite, ce taux converge progressivement vers 1, traduisant le fait que l'algorithme n'arrive plus à engendrer de nouveaux individus non-dominés par rapport aux individus de la population courante. Au fur et à mesure de ce processus, la taille du front de Pareto se stabilise, rendant les taux d'amélioration et de consolidation quasiment « complémentaires » au sens où $T_A \approx 1 - T_C$.

Concernant les variantes agissant sur les opérations génétiques, la stabilisation de ces deux indicateurs intervient plus vite pour la variante P200M100C0 que pour la variante P200M0C100 et la référence (Figure 5-57). Cela traduit l'inefficacité, déjà observée concernant l'hypervolume, de cette recherche s'apparentant à une recherche aléatoire pure. En effet, si lors des premières générations, le front de Pareto de cette variante s'améliore convenablement (mais déjà de façon significativement moindre par rapport aux deux autres variantes), rapidement, ce front n'évolue pratiquement plus selon les taux T_A et T_C , et ce jusqu'à la fin du processus. À propos de la variante P200M0C100, il peut être remarqué qu'elle

permet une amélioration plus franche que la variante de référence sur le premier tiers du processus (i.e. de 0 à 2 000 évaluations), corroborant l'analyse précédente sur l'hypervolume (Figure 5-55). La quasi-atteinte du front de Pareto optimal dès 2 000 évaluations explique l'évolution rapide et conjointe de T_A (diminution) et T_C (augmentation) pour cette variante. Quant à la variante de référence, une amélioration plus progressive est observée, le taux de mutation plus élevé ralentissant la convergence.

Pour les variantes permettant d'étudier l'influence de la taille de la population, des comportements très contrastés sont observables (Figure 5-58), illustrant bien l'enjeu du choix d'une taille de population adéquate. À la fin du processus, la variante $P2000M15C80$ n'est pas stabilisée, comme l'indiquent la valeur de T_A et T_C . En effet, plus de la moitié des individus du front à la génération 2 a été remplacée dans le front de la génération 3. Le très faible nombre de générations (3) explique que l'algorithme n'a pas encore convergé au bout des 6 000 évaluations. Avec beaucoup plus d'évaluations, le front de cette variante avoisinera néanmoins de manière approchée le front optimal. À l'inverse, la variante à faible taille de la population ($P20M015C08$) présente des taux atteignant rapidement (entre 1 000 et 2 000 évaluations) des valeurs proches de 0 (pour T_A) et de 1 (pour T_C), traduisant une convergence très rapide de ce front grâce au nombre élevé d'itérations de l'algorithme. Cette convergence ne reflète naturellement pas la qualité du front obtenu. L'analyse de l'hypervolume avait effectivement montré que la taille de la population de cette variante était insuffisante pour décrire l'ensemble des compromis du front optimal.

En définitive, les taux d'amélioration et de consolidation fournissent des informations utiles sur la convergence d'un algorithme (au sens général) et peuvent permettre de détecter si celui-ci est encore capable d'identifier de manière efficiente, de nouvelles solutions non-dominées. Par contre, ces indicateurs ne permettent pas de s'assurer que la qualité des solutions fournies par l'algorithme soit optimale, ou du moins élevée (cas de la variante $P200M100C0$ par exemple). Si l'algorithme n'a, au contraire, pas convergé au sens de ces indicateurs, il est par contre certain que la qualité des solutions n'est pas optimale (cas de la variante $P2000M15C80$ par exemple). Cette étude préliminaire confirme l'intérêt d'utiliser ces indicateurs pour la mise en place d'un critère d'arrêt adaptatif (en complément d'un nombre de générations fixé *a priori*), mais aussi qu'un autre indicateur est nécessaire pour évaluer la qualité des solutions obtenues.

5.5.1.3. RÉSULTATS CONCERNANT LE TAUX DE DOUBLONS

Dans l'objectif de tirer un maximum d'informations de cette étude préliminaire, il nous a également semblé opportun de suivre, pour les différentes

variantes, et en fonction du nombre d'évaluations, le taux de doublons (T_d) au sein du front de Pareto. Le taux de doublons offre effectivement un regard intéressant sur la dualité entre intensification et diversification de la recherche. À taille de population constante, un fort taux de doublons sera le témoin d'une exploration favorisant davantage l'intensification, et à l'inverse, un taux faible traduira une diversification de la recherche plus prononcée que l'intensification. De manière générale, sachant le nombre d'individus dans le front de Pareto optimal (97), il est possible de connaître la valeur du taux de doublons vers laquelle chaque variante devrait tendre si le front approché atteignait le front optimal :

- pour les variantes à 200 individus : $\approx 50\%$;
- pour les variantes à 20 individus : 0% ;
- pour les variantes à 2 000 individus : $\approx 95\%$.

L'ensemble des résultats est présenté à la Figure 5-59. Le résultat le plus intéressant concerne l'analyse croisée de l'évolution du taux de doublons de la variante *P200M0C100* et de la référence *P200M15C80*. En effet, dans la première partie du processus, il peut être observé que, par rapport à la référence, le taux de doublons de la variante *P200M0C100* augmente plus vite et atteint une valeur plus élevée (68 % contre 64 %). L'augmentation du nombre de doublons traduit qu'à ce stade du processus, l'intensification de la recherche est prépondérante à la diversification. Ce pic atteint, la diversification de la recherche a tendance à prendre le pas sur l'intensification jusqu'à la fin du processus, le taux se réduisant alors pour arriver à des valeurs proches : 52 % pour la variante *P200M0C100* et 60 % pour la référence. Dans l'étude de cas considérée, accélérer la convergence revient ainsi à renforcer l'intensification par rapport à la diversification de la recherche. Sans mutation, la variante *P200M0C100* génère en effet suffisamment de diversité pour identifier, à 6 000 évaluations, la quasi totalité des individus, traduisant une certaine régularité des fonctions objectifs (constatée dans les parties 5.3 et 5.4). En comparaison, la variante *P200M100C0* n'affiche jamais un taux de doublons supérieur à 5 % tout au long du processus, illustrant les difficultés d'une recherche s'apparentant à une recherche aléatoire pure à converger vers les meilleures solutions du problème. Bien que proches, les valeurs à 6 000 évaluations des taux de doublons de la variante de référence et de la variante *P200M0C100* mettent néanmoins en évidence des écarts de comportement négligés par l'hypervolume, soulignant l'intérêt d'intégrer comme indicateur complémentaire le taux de doublons.

Concernant la variante à taille de population élevée (*P2000M15C80*), le constat est le même que précédemment : le trop faible nombre de générations ne permet pas, dans le budget d'évaluations fixé, de converger vers un taux de 95 %, correspondant à la valeur à laquelle le taux devrait être si le front de Pareto approché avait atteint le front optimal. Pour la variante *P20M15C80*, le taux de doublons peut varier entre 0 et 95 % au maximum, en raison d'une taille de

population environ cinq fois plus petite que le nombre d'individus dans le front de Pareto optimal. De manière cohérente avec l'analyse de l'hypervolume, il peut être constaté que le taux de doublons est plus régulièrement égal à zéro à partir de 2 000 évaluations environ, ce qui correspond au stade où le front ne peut plus s'améliorer. Les processus stochastiques intervenant dans la mutation et la sélection impliquent néanmoins que ce taux oscille jusqu'à la fin du processus.

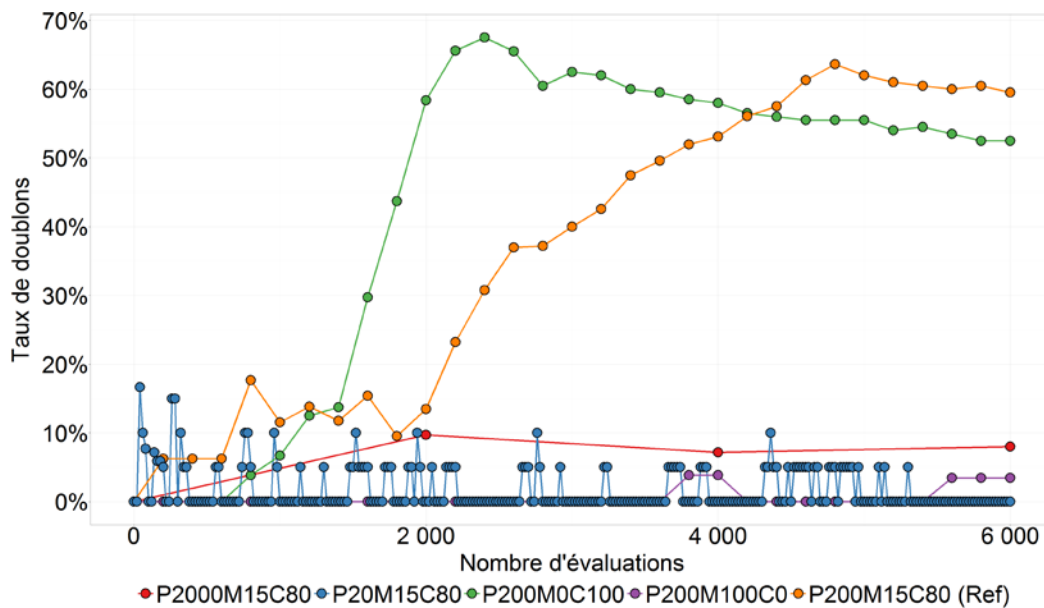


Figure 5-59. Évolution du taux de doublons dans le front de Pareto en fonction du nombre d'évaluations pour les variantes de l'étude préliminaire

Tout comme les taux d'amélioration et de consolidation, le taux de doublons apporte une vision complémentaire sur le comportement des variantes d'algorithme étudiées. Néanmoins, en l'absence de la connaissance du front de Pareto optimal, seule l'évolution du taux durant le processus peut être analysée.

En synthèse de cette étude préliminaire, il peut être souligné que le choix de tester quelques variantes singulières (dont les traits ont été volontairement forcés) a été riche d'enseignements sur la façon dont l'algorithme et ses mécanismes opèrent selon les réglages testés. Les quatre indicateurs calculés ont permis d'observer le comportement de l'algorithme sous des regards complémentaires, même si l'hypervolume est le seul à offrir une vision complète en matière de convergence et de qualité des solutions obtenues. Les résultats montrent un intérêt notable à régler de manière efficace l'algorithme NSGA-II, ses performances étant en effet fortement dépendantes des valeurs de ses paramètres quantitatifs (taille de la population, taux de croisement et taux de mutation). En ce sens, cette étude préliminaire correspond à un examen qualitatif de la robustesse de l'algorithme au changement de valeurs de ses paramètres qualitatifs. De plus, cette étude a également mis en évidence

l'étroite interaction existant entre ces différents paramètres, et la nécessité de les appréhender du mieux possible dans le but de trouver un équilibre satisfaisant entre les moteurs de l'exploration (intensification *versus* diversification) et les contraintes pratiques de cette dernière (nombre d'itérations *versus* nombre possible d'évaluations).

Ce travail exploratoire sur le réglage de l'algorithme NSGA-II a été poursuivi par la mise en place d'une méthode de paramétrage par échantillonnage. Au préalable, une étude qualitative de la robustesse au changement de graines aléatoires a été effectuée.

5.5.2. Paramétrage par méthode d'échantillonnage

5.5.2.1. ROBUSTESSE AU CHANGEMENT DE GRAINES ALÉATOIRES

Le caractère stochastique des mécanismes évolutionnaires engendre un biais dans les résultats qu'il convient idéalement d'intégrer en répétant à plusieurs reprises le même processus d'optimisation, et en analysant de manière statistique les résultats. Pour des raisons de temps de calcul, nous avons choisi de fixer la graine du générateur de nombres aléatoires (appelée *graine aléatoire* par la suite), et de répéter les processus uniquement sur deux variantes, de manière à évaluer qualitativement l'amplitude de la variabilité engendrée. Sans constituer une preuve, l'interprétation des résultats de l'étude préliminaire est apparue cohérente avec les mécanismes évolutionnaires mis en exergue, tendant à indiquer que cette amplitude est vraisemblablement modérée, et n'est pas de nature à modifier fondamentalement les résultats de l'étude de cas considérée.

Pour s'en assurer, deux variantes « extrêmes » en matière de taille de population ont été arbitrairement choisies : *P2000M15C80* et *P100M10C90*. Pour cette dernière, il semblait inutile de tester une variante avec une population de 20 individus. Nous avons donc sélectionné une variante à 100 individus (proche du nombre de solutions dans le front de Pareto optimal) et choisi des valeurs des taux de croisement et de mutation intermédiaires entre la variante de référence (*P200M1C80*) et celle ayant présenté la meilleure performance dans l'étude préliminaire (*P200M0C100*). Pour les deux variantes sélectionnées, les optimisations ont été répétées cinq fois, avec une graine aléatoire différente. La Figure 5-60 présente, pour la variante *P2000M15C80*, l'évolution de l'hypervolume en fonction du nombre de générations et selon la graine aléatoire associée. La Figure 5-61 est l'équivalent pour la variante *P100M10C90*.

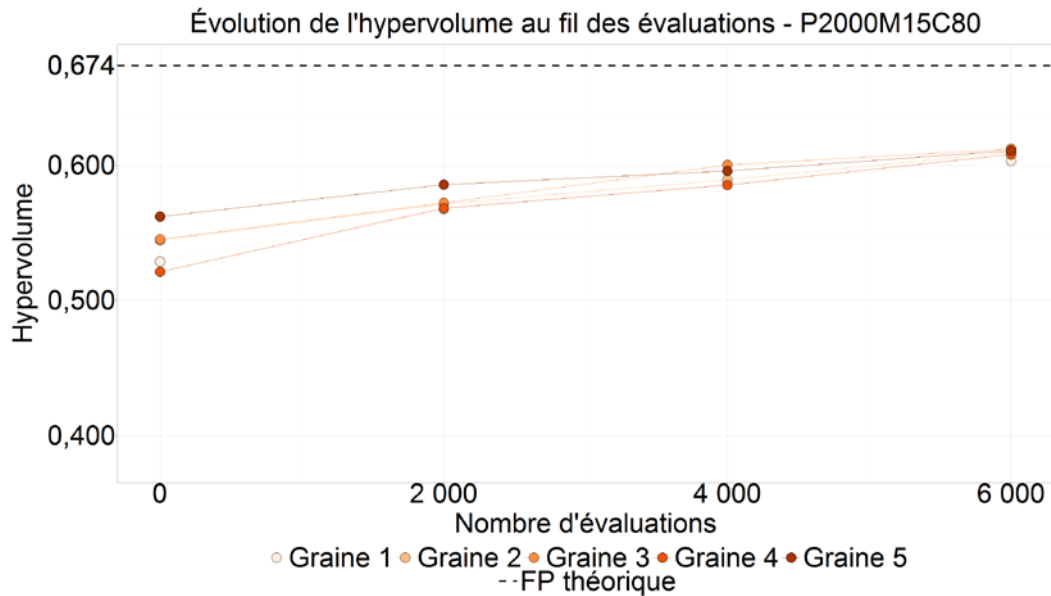


Figure 5-60. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations selon cinq graines aléatoires différentes, dans le cas de la variante P2000M15C80

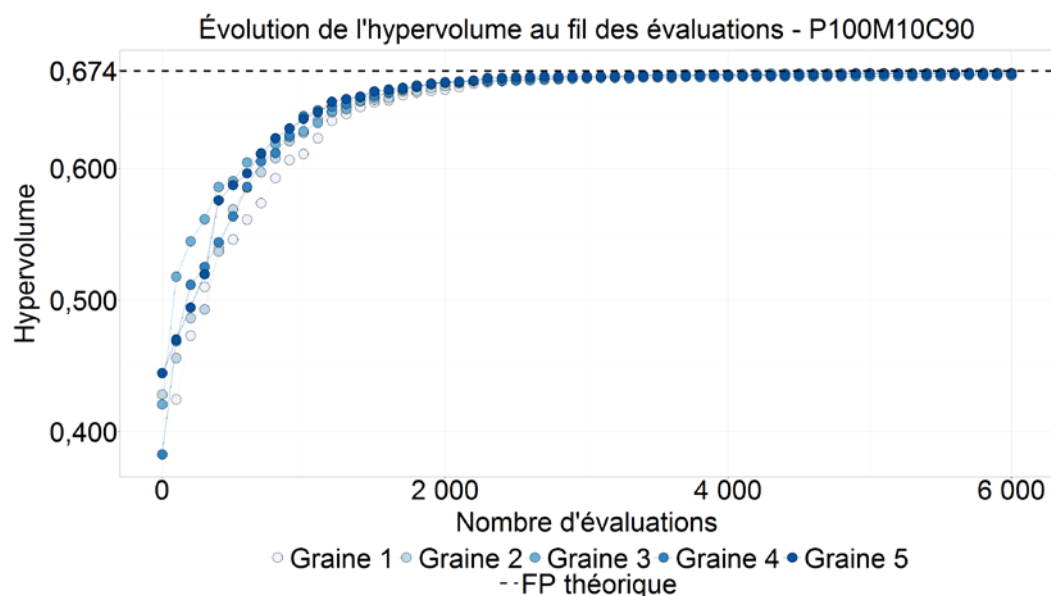


Figure 5-61. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations selon cinq graines aléatoires différentes, dans le cas de la variante P100M10C90

D'après les résultats de ces figures, il ressort que le caractère aléatoire du processus génétique engendre une certaine variabilité dans la valeur de l'hypervolume, notamment au début du processus. Cette variabilité tend à s'estomper au cours de l'avancée de l'optimisation. À la fin du processus, elle reste logiquement plus élevée pour la variante à 2 000 individus que celle à 200. Cependant, l'amplitude de cette variabilité reste modérée après 2 000 simulations, et ne remet pas en cause les comportements observés dans l'étude

préliminaire (5.5.1), d'autant que la même graine aléatoire est fixée pour comparer les variantes. D'après cette étude qualitative de la robustesse de l'algorithme au changement de graines aléatoires, il semble acceptable dans le cas considéré d'appliquer une méthode de paramétrage en s'affranchissant de multiples répétitions pour chaque variante qui auraient été nécessaires pour prendre en compte la stochasticité inhérente aux mécanismes évolutionnaires.

5.5.2.2. PARAMÉTRAGE PAR PLAN DE BOX ET BEHNKEN

Les résultats de l'étude préliminaire ont montré que la variante de référence, principalement basée sur les valeurs de la littérature, présentait de bonnes performances. Ceci nous a conduits à l'utiliser comme base pour la réalisation du plan d'expérience. Les résultats ont également indiqué que le taux de mutation était probablement trop élevé, et qu'une taille de population proche de celle du front de Pareto optimal présentait des performances intéressantes. Les trois niveaux étudiés pour chacun des paramètres quantitatifs, donnés dans le Tableau 5-13, sont issus de ces considérations.

Tableau 5-13 : Niveaux retenus dans le plan de Box et Behnken

Paramètre quantitatif	Niveau « -1 »	Niveau « 0 »	Niveau « 1 »
Taille de la population	100	200	300
Taux de mutation	1 %	5 %	10 %
Taux de croisement	70 %	80 %	90 %

La relation (5.8) ci-après fournit les douze essais correspondants du plan d'expériences *D* de Box et Behnken. Les résultats de ce plan sont présentés à la Figure 5-62, en matière d'évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations. La variante de référence (*P200M15C80*) a été ajoutée à ces douze essais. En remarque générale, il peut être noté que les comportements observés sont similaires, bien plus que ceux étudiés lors de l'étude préliminaire. Le plan *D* pouvant être vu comme des variations peu éloignées de la variante de référence, cette observation générale semble logique. Des écarts relativement nets peuvent tout de même être remarqués, et semblent principalement attribuables à la taille de population.

$$D = \begin{pmatrix} 100 & 1 & 80 \\ 300 & 1 & 80 \\ 100 & 10 & 80 \\ 300 & 10 & 80 \\ 100 & 5 & 70 \\ 300 & 5 & 70 \\ 100 & 5 & 90 \\ 300 & 5 & 90 \\ 200 & 1 & 70 \\ 200 & 10 & 70 \\ 200 & 1 & 90 \\ 200 & 10 & 90 \end{pmatrix} \quad \text{soit} \quad \begin{pmatrix} P100M1C80 \\ P300M1C80 \\ P100M10C80 \\ P300M10C80 \\ P100M5C70 \\ P300M5C70 \\ P100M5C90 \\ P300M5C90 \\ P200M1C70 \\ P200M10C70 \\ P200M1C90 \\ P200M10C90 \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

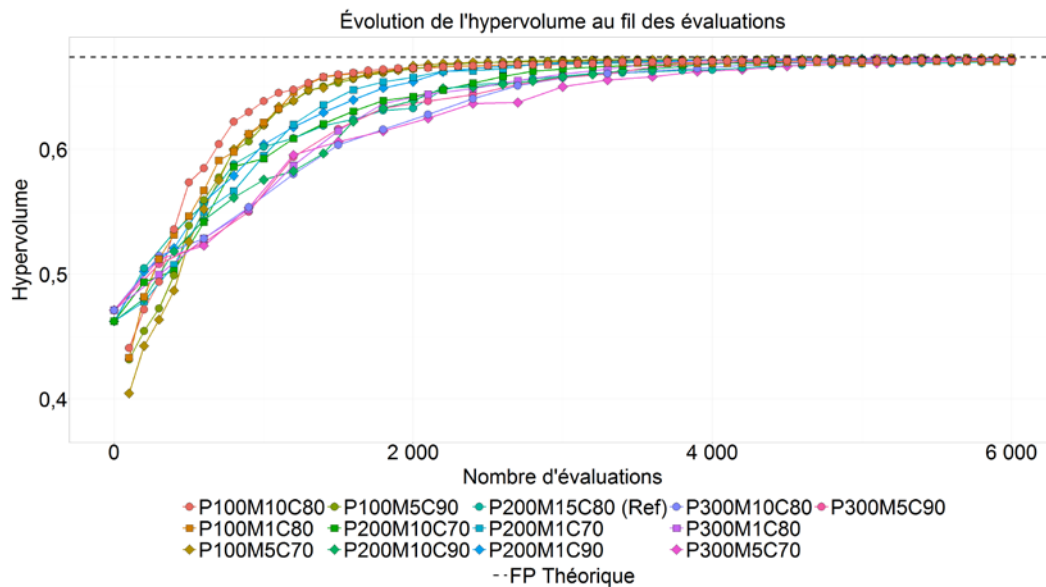


Figure 5-62. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations pour les douze variantes du plan de Box et Behnken plus la variante de référence

Les Figure 5-63 à Figure 5-66 reprennent les résultats de la Figure 5-62. Trois évolutions distinctes peuvent être observées, illustrant le fait que la taille de population apparaît comme le paramètre explicatif majeur des différences de comportement observées. Les variantes à taille de population fixée à 100 semblent en effet plus performantes que celles composées de 200 individus, elles-mêmes plus performantes que les variantes à 300 individus. Sur cette étude, plus la taille de population est proche de celle du front de Pareto optimal, plus la variante sera potentiellement performante. Il s'agit d'un compromis plutôt intuitif : d'un côté, la taille de population doit *a minima* être égale à celle du front optimal pour espérer décrire l'ensemble du front, et de l'autre côté, plus cette taille sera grande vis-à-vis de celle du front, plus le nombre d'itérations sera réduit, et la vitesse de convergence diminuée. Cependant, ce raisonnement n'est probablement valable que pour des fonctions relativement régulières. En effet, pour des fonctions très irrégulières, une taille de population plus importante pourrait apporter une diversité supplémentaire nécessaire pour s'affranchir de

minimums locaux ou pour capter des points singuliers. À taille de population fixée pour ces trois sous-groupes de variantes, il peut être noté que les variations opérées sur les taux de mutation et de croisement n'engendrent que très peu de différences de comportement au sein de chacun des groupes. Aucune tendance claire n'a pu être extraite des résultats. Deux raisons principales semblent pouvoir l'expliquer. La première est le fait que l'amplitude des écarts observés est du même ordre de grandeur que celle engendrée par la variabilité inhérente des processus évolutifs, due à leur caractère aléatoire. Sans une analyse statistique basée sur de multiples répétitions de chaque essai pour prendre en compte cette stochasticité, il n'est pas possible d'émettre davantage de conclusions sur cette étude. Même si cela était réalisé, il ne serait néanmoins pas assuré que plus d'informations seraient extraites. En effet, la seconde raison pourrait être simplement le fait que, dans l'étude de cas considérée, les réglages testés sur les taux de mutation et de croisement sont à peu près équivalents au regard de l'influence prépondérante de la taille de la population. Soulignons en effet que les plages de valeurs explorées ici étaient relativement réduites : de 1 à 10 % pour le taux de mutation, et de 70 à 90 % pour le taux de croisement.

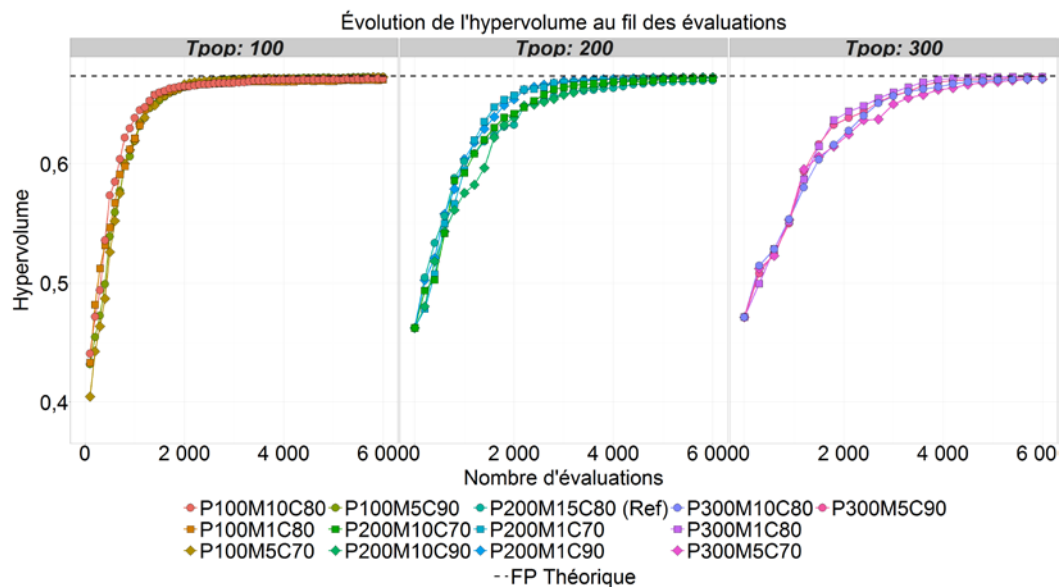


Figure 5-63. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations pour les douze variantes du plan de Box et Behnken plus la variante de référence, regroupées selon la taille de la population

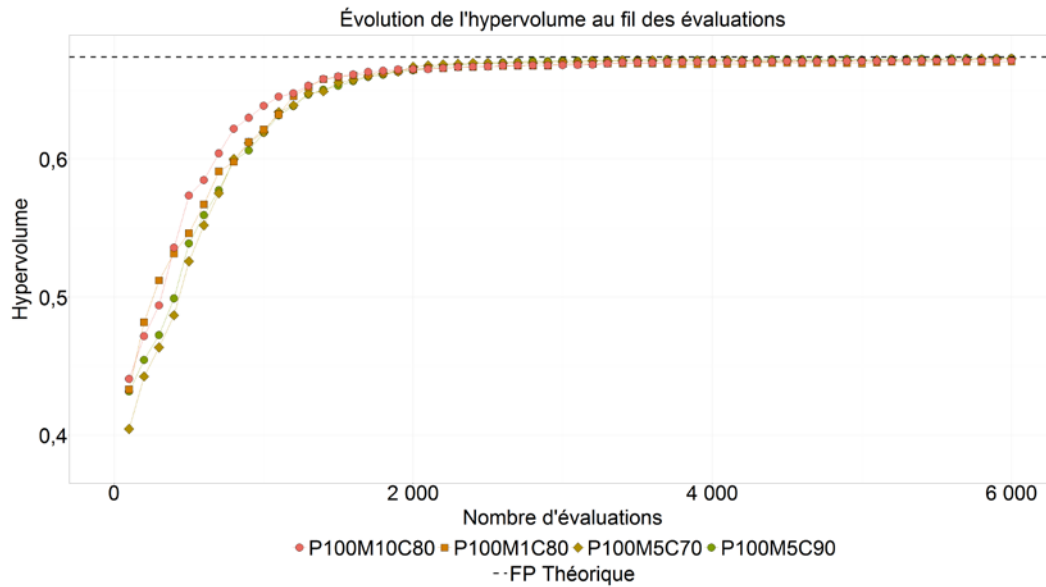


Figure 5-64. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations pour les variantes à 100 individus

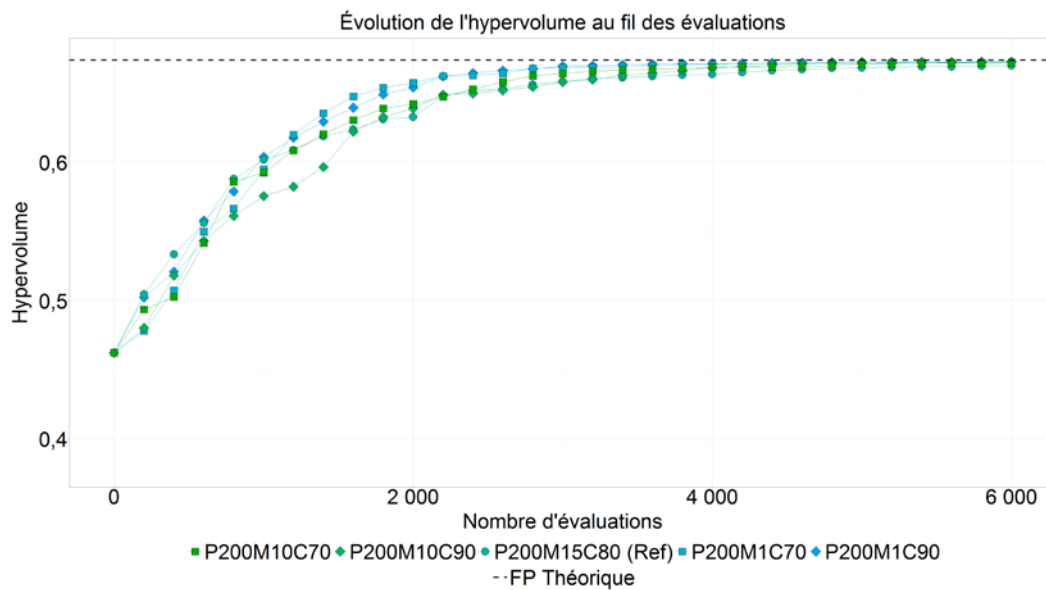


Figure 5-65. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations pour les variantes à 200 individus

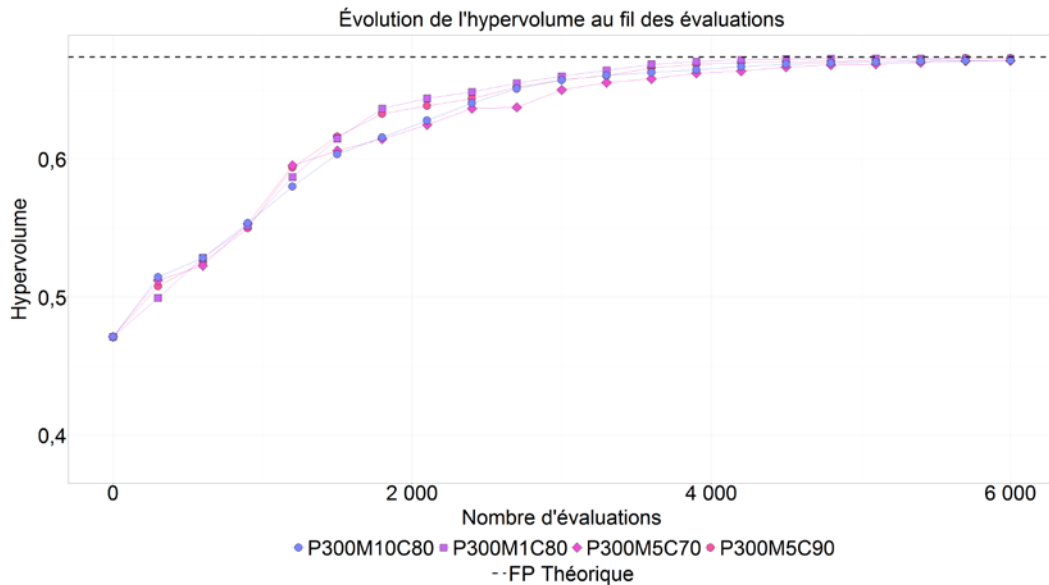


Figure 5-66. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations pour les variantes à 300 individus

5.5.3. Conclusion de la partie

L'étude présentée correspondait à un souhait d'aborder la problématique du paramétrage des algorithmes évolutionnaires, problématique ayant été peu traitée dans le domaine du bâtiment. L'objectif a été de réaliser un travail exploratoire, relativement simple et rapide à mettre en place, et permettant avant tout, de mieux appréhender les enjeux de cette problématique, et d'avancer par étape dans les questions posées par le sujet sachant que les temps de calcul associés à ce genre d'études peuvent rapidement devenir prohibitifs. Aussi, la méthodologie qui en résulte peut volontairement apparaître comme peu ambitieuse. Plus que de trouver « le » paramétrage optimal, l'ambition était davantage de comprendre plus finement comment les mécanismes évolutionnaires régissent l'exploration de l'espace de recherche. À cet égard, ce travail exploratoire a été riche d'enseignements. L'étude préliminaire a effectivement permis de mettre en évidence que le réglage des trois paramètres quantitatifs étudiés (taille de population, taux de mutation et taux de croisement) pouvait avoir une influence significative sur la performance de l'algorithme, et que la variante de référence, basée sur des valeurs de la littérature, présentait une convergence relativement satisfaisante, même s'il a été possible de trouver une variante obtenant une qualité de solutions équivalente en trois fois moins d'évaluations. Différents indicateurs ont été calculés, offrant des visions complémentaires du comportement des variantes, mais seul l'indicateur d'hypervolume propose un regard suffisamment complet. La suite de

l'étude a montré une relative robustesse de l'algorithme au changement de graines aléatoires, et l'influence prépondérante, dans l'étude de cas considérée, de la taille de la population. Par rapport à ce paramètre, la convergence s'améliore d'autant que la taille de la population est proche de celle du front de Pareto optimal.

Suite à cette étude, différentes perspectives peuvent être dressées pour prolonger et améliorer le travail exploratoire réalisé. Il nous semble intéressant de reproduire un travail similaire à celui-ci avec d'autres fonctions objectifs, d'autres variantes de conception, et d'autres types de bâtiments, de manière à évaluer dans quelle mesure les conclusions obtenues dans l'étude de cas considérée sont généralisables. En s'accordant un budget d'évaluations beaucoup plus important, il semble également utile de prendre en compte de manière quantitative le caractère aléatoire inhérent aux processus évolutionnaires. Cela permettrait une comparaison plus fine entre les variantes, notamment si, en parallèle, une méthode de paramétrage plus avancée que la méthode par échantillonnage est retenue. Les taux d'amélioration et de consolidation pourraient être exploités pour la mise en œuvre d'un critère d'arrêt adaptatif, permettant de stopper automatiquement le processus quand il a convergé. Par rapport à un nombre *a priori* fixé de générations, cela éviterait un arrêt prématuré (nuisant à la qualité des solutions obtenues) ou trop tardif (pénalisant le temps global d'exécution). Ce critère d'arrêt adaptatif pourrait être utilisé en complément d'un nombre *a priori* fixé de générations, de manière à laisser à l'utilisateur le contrôle du budget d'évaluations tout en profitant des informations de convergence pour stopper le processus au bon moment, et rendre plus efficiente la démarche. Dans cette optique, une taille de population adaptative pourrait également permettre d'améliorer le processus.

En définitive, la théorie sur les algorithmes évolutionnaires nous apprend qu'il n'existe pas de réglage optimal pour toutes les configurations. Pour identifier des réglages satisfaisants sur son domaine d'application, l'utilisateur de ces techniques doit ainsi acquérir une connaissance relativement fine des moteurs de l'exploration opérant dans son algorithme, et cette connaissance passe par l'accumulation d'observations à travers différentes expérimentations. Le travail exploratoire présenté dans cette thèse a ainsi visé à apporter une contribution dans cette démarche à long terme, devant être poursuivie et améliorée.

5.6. CONCLUSION DU CHAPITRE

L'objet de ce chapitre était l'application de la démarche proposée dans ces travaux sur une étude de cas réel. Via une collaboration avec un constructeur de maisons individuelles dans le cadre du projet COMEPOS, la démarche a

effectivement pu être testée lors d'un processus de conception intégrée incluant chercheurs, industriels et constructeurs. Si dans la première partie de la thèse, il n'a pas été possible d'appliquer pleinement la démarche (les développements informatiques n'étaient pas encore achevés), expliquant les moyens d'optimisation limités en phase amont. Cette étude de cas a été poursuivie afin de déployer la démarche dans son ensemble (ASAI inclus). Cette partie a ainsi présenté les aspects méthodologiques, principale contribution de ces travaux.

Il apparaît qu'une aide à la décision assistée par optimisation multicritère semble tout à fait possible au vu des temps d'exécution constatés et de la qualité des résultats obtenus, d'autant que des accélérations sont possibles via un meilleur réglage des paramètres propres à l'algorithme génétique NSGA-II. La collaboration avec l'architecte a mis en évidence toute l'importance d'un processus itératif et graduel, où l'outil d'optimisation et le concepteur se guident mutuellement vers une exploration plus pertinente du champ des possibles. Très concrètement, plusieurs résultats d'optimisation ont permis d'orienter l'architecte dans ses choix. À l'inverse, par l'établissement d'un cahier des charges intégrant les différents degrés de liberté et contraintes du projet, l'architecte a permis de réduire significativement les espaces de recherche explorés (notamment concernant les pourcentages de surface vitrée par façade en phase esquisse). Des travaux complémentaires sur l'analyse des données en plus grande dimension et la prise de décisions via des méthodes d'aide multicritère à la décision semblent être les perspectives les plus naturelles à proposer sur cet aspect.

En matière de degré de robustesse de la démarche, des méthodes originales ont été mises en œuvre pour étudier, selon deux aspects, la problématique de la longue durée de vie des bâtiments. Un modèle stochastique de comportement des occupants a permis d'appréhender l'ordre de grandeur de l'influence générée par le changement de type du ménage occupant la maison. Une approche similaire a été mise en place avec la création de fichiers météorologiques prospectifs, selon deux scénarios du GIEC, pour évaluer le risque de non-robustesse d'une décision à l'évolution prévisible du climat jusqu'à la fin du siècle. Il ressort, suite à ces études, que les performances sont généralement affectées significativement, et qu'une modification des choix de conception est possible. La disponibilité et la qualité des données apparaissent également comme essentielles pour des prévisions plus fiables à long terme. Ces études ont permis d'apporter des éléments méthodologiques pour progresser vers une aide à la décision plus pertinente sur le cycle de vie du bâtiment, et constituent un premier pas vers l'optimisation robuste. Enfin, un travail exploratoire sur le paramétrage de l'algorithme génétique NSGA-II a mis en évidence la nécessité de bien appréhender les mécanismes évolutionnaires en jeu lors de l'optimisation, pour pouvoir régler de manière efficace l'algorithme. Des

différences singulières de comportement ont été illustrées, et des gains ont été mis en évidence avec d'autres réglages que celui utilisé initialement (basé sur les valeurs de la littérature). L'étude réalisée permet cependant d'observer que le réglage initial avait une performance globalement acceptable. Si sur l'étude de cas considérée, le processus semble assez robuste par rapport au caractère aléatoire des mécanismes évolutionnaires, l'état de l'art souligne que le conditionnement du problème peut radicalement changer les performances de l'algorithme. Des études complémentaires, sur d'autres types de bâtiment et avec d'autres fonctions objectifs, pourraient donc être utiles pour évaluer la portée des résultats obtenus, et acquérir davantage de connaissances sur ce sujet peu abordé dans son application au domaine du bâtiment. Face à cette problématique, des paramètres dits auto-adaptatifs semblent intéressants à tester, et constituent une perspective à ce travail.

Conclusion et perspectives

La généralisation planifiée du Bâtiment à Énergie POSitive constitue un enjeu considérable de développement durable, notamment dans une vision à long terme. Sa conception relève d'une problématique d'aide multicritère à la décision complexe, nécessitant d'étudier les possibilités d'accompagner les concepteurs dans leur prise de décisions. Conformément aux objectifs initiaux annoncés, cette thèse s'est intéressée au développement d'une méthodologie utilisant l'optimisation multicritère dans le but de fournir une aide à la décision opérationnelle et robuste pour l'écoconception de maisons à énergie positive (MEPOS), sous une approche multicritère et sur tout le cycle de vie. Dans un premier temps, nous rappellerons dans cette conclusion les principaux apports des chapitres constitutifs de cette thèse. Nous évoquerons finalement des perspectives pour poursuivre ces travaux.

BILAN DU TRAVAIL EFFECTUÉ

❖ Conclusion sur le chapitre 1

Le premier chapitre a servi de support pour poser la problématique de l'écoconception de maisons à énergie positive. Un état de l'art relativement large sur le bâtiment à énergie positive a tout d'abord été effectué, mis en relief par l'analyse comparative de plusieurs labels, définitions, et exemples existants de maisons à énergie positive, mais aussi par une revue de littérature grise sur les initiatives enclenchées autour de ce concept pour faciliter sa pénétration sur le marché. Il a permis de souligner la pluralité des définitions existantes, même si des cadres communs et cohérents de définitions ont été proposés à l'échelle européenne et internationale pour apporter plus de lisibilité à ce concept tout en laissant la possibilité à des déclinaisons nationales, nécessaires au contexte spécifique à chaque pays. Un consensus semble se dégager autour d'un bâtiment généralement connecté à un ou des réseaux énergétiques (*a minima* un réseau électrique), devant respecter une valeur seuil (restant à fixer) par rapport à un bilan annuel en énergie primaire non renouvelable, soit entre l'énergie importée et exportée avec ce(s) réseau(x), soit entre l'énergie consommée et l'énergie produite. Si ce cadre n'exclut pas l'intégration des impacts environnementaux, en pratique, les exigences fixées dans les labels sont généralement peu contraignantes (obligation d'affichage seulement) et partielles (un seul impact sur une seule étape du cycle de vie). Le nombre limité d'études d'optimisation identifiées dans la littérature scientifique utilisant un

modèle environnemental de simulation du cycle de vie corrobore ce constat, s'expliquant en partie par un manque de connaissance et de reconnaissance de méthode comme l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), mais aussi par un choix restreint d'outils dédiés pour les bâtiments. Ce contexte positionne clairement l'une des contributions de la thèse visant à mettre en œuvre une approche multicritère et multiétape, via un outil d'ACV diffusé à des professionnels (*novaEQUER*), pour l'évaluation et l'optimisation de la performance environnementale de bâtiments neufs, et intégrant les interactions entre le bâtiment, son environnement et ses occupants. La pratique actuelle en conception a alors été confrontée aux besoins émergents liés à l'arrivée des BEPOS dans un contexte économique sous tension, et de contraintes énergétiques et environnementales toujours plus élevées. L'analyse a permis de faire apparaître les limites du processus actuel, invitant à changer de paradigme et proposer une aide à la décision originale, basée sur un algorithme génétique d'optimisation multicritère. L'état de l'art a en effet souligné l'intérêt d'une relation de dominance d'ordre partiel pour identifier des solutions efficaces et surtout une surface de compromis, la plus large possible. Le chapitre 1 inclut tout d'abord une revue des différents verrous à l'intégration de l'optimisation dans les outils de conception, permettant de finalement proposer une démarche globale, associant des méthodes complémentaires à l'optimisation dans le but de fournir une aide à la décision opérationnelle et robuste pour l'écoconception de maisons à énergie positive. Cette démarche repose sur les principaux éléments suivants :

- La définition d'un système, d'un objectif et d'une unité fonctionnelle au sens de l'ACV : il s'agit d'élaborer des concepts de MEPOS minimisant conjointement impacts environnementaux et coût de construction, sous contrainte de bilan énergétique positif, et respectant *a posteriori* un critère de confort.
- La construction d'une plateforme de conception globale, basée sur le couplage entre des modèles d'évaluation des performances (*COMFIE*, *novaEQUER*, et une base de données de coût) et des méthodes mathématiques tels que des techniques d'optimisation, d'analyses de sensibilité et d'analyses d'incertitudes. Le développement de méthodologies originales pour étudier le risque de non-robustesse d'une décision selon deux changements possibles : les scénarios d'occupation (le type de ménage avec l'utilisation d'un modèle stochastique d'occupation des logements), et l'évolution prévue du climat jusqu'à la fin du siècle (avec la mise en place de scénarios climatiques prospectifs du GIEC).
- L'expérience d'un processus de conception intégrée en temps réel appliquée à un projet de construction MEPOS, permettant, via une

collaboration avec un constructeur, de tester la démarche sur une étude de cas.

❖ Conclusion sur le chapitre 2

Dans l'objectif d'identifier les paramètres de conception les plus influents mais aussi de gérer les incertitudes pesant sur de nombreuses entrées des modèles, le chapitre 2 a proposé une revue générale sur les méthodes d'analyse de sensibilité et d'analyse d'incertitude (ASAI). Leur intérêt au regard du contexte de ces travaux de thèse a été montré, et les plus adaptées, sélectionnées, en fonction des compromis souhaitables entre finesse de la méthode et temps d'exécution, mais aussi en fonction du nombre de paramètres étudiés. Ont ainsi été retenues, la technique du criblage de Morris pour réduire la combinatoire de l'espace de décision à explorer en amont de l'optimisation, et une propagation d'incertitudes par échantillonnage stratifié (LHS) pour évaluer le niveau d'incertitude de solutions optimales. L'état de l'art a également mis en évidence la problématique essentielle de la fiabilité des modèles, notamment dans le contexte des bâtiments à haute performance énergétique. À cet effet, un soin particulier a été apporté pour justifier l'utilisation des modèles retenus et a conduit, dans un second temps, à la mise en œuvre d'une démarche de validation expérimentale par comparaison à des mesures de température sur l'outil de simulation *COMFIE*, modèle thermique dynamique aux volumes finis, réduit par analyse modale dans un compromis entre vitesse et précision des calculs. Les résultats de ce travail, appliqué à une maison passive, ont montré que la dynamique globale pouvait être reproduite de manière satisfaisante par le logiciel, et que les écarts étaient comparables à ceux d'une référence internationale comme *EnergyPlus*. La prépondérance nouvelle de certains paramètres jusqu'alors plutôt négligés tels que l'albédo a également pu être mise en évidence. À travers ce chapitre, a finalement été développé ce qui doit constituer l'étape amont et l'étape aval du processus d'optimisation proposé, à savoir l'identification des paramètres de conception les plus influents pour réduire le nombre de combinaisons à évaluer en optimisation, et l'évaluation du degré de confiance dans les performances de solutions obtenues par optimisation.

❖ Conclusion sur le chapitre 3

Dans l'objectif de permettre l'élaboration de concepts de MEPOS performantes, et de décrire le plus largement possible les compromis accessibles, le chapitre 3 présente une description des mécanismes évolutionnaires de base régissant le fonctionnement de l'algorithme génétique NSGA-II retenu dans ces travaux. La performance de l'algorithme pouvant être conditionnée au réglage de ses paramètres internes, il est effectivement fondamental de bien comprendre les principaux moteurs de l'exploration et les différentes alternatives possibles pour façonner un algorithme évolutionnaire bien adapté au problème

posé, en particulier en matière de représentation du génome, d'opérateurs génétiques et de stratégies de sélection. L'état de l'art a également mis en évidence que la performance d'un algorithme peut être sensiblement conditionnée au réglage de ses paramètres internes, et que celui-ci dépend généralement du problème formulé (type de représentation de l'information génétique, fonctions objectifs, paramètres de conception, etc.). Ce résultat nous a invités à ne pas faire l'économie d'étudier le comportement de l'algorithme retenu dans son cadre spécifique d'utilisation. Un état de l'art a été réalisé sur la problématique du paramétrage, ouvrant la voie à de nombreuses perspectives d'études sur un sujet, rarement abordé dans la communauté du bâtiment. Il a visé à répondre aux questions suivantes :

- Sur quels aspects la qualité d'un algorithme et de ses variantes doit être étudiée et comparée ?
- À travers quels indicateurs est-il possible de mesurer et comparer ces différentes composantes de la qualité ?
- Quelles sont les méthodes disponibles pour mener une optimisation de cette qualité et dans quel cadre sont-elles adaptées ?

Pour des raisons principalement de temps de calcul, une méthodologie volontairement modeste a été choisie pour conduire ce travail exploratoire, et a été menée dans le chapitre 5. Nous dressons néanmoins ici les conclusions des résultats obtenus. Trois paramètres quantitatifs ont été étudiés : la taille de la population, le taux de croisement, et le taux de mutation. Une phase préliminaire a tout d'abord été menée pour évaluer le degré d'importance de cette problématique dans notre contexte. Les résultats ont en effet montré des différences de comportement notables. L'une de ces variantes a présenté, selon l'indicateur d'hypervolume utilisé, une performance équivalente à celle de la référence, basée sur des valeurs de la littérature, mais pour une durée d'exécution réduite d'un facteur 3, semblant indiquer que des gains intéressants pourraient être obtenus en étudiant plus finement cette thématique du paramétrage. Cette variante présentait un taux de croisement maximal et un taux de mutation nul, tendant à faire penser que la diversification de la recherche était trop prononcée dans la variante de référence, nuisant à sa convergence même si elle a été considérée comme acceptable. Un plan d'expérience (de Box et Behnken) a prolongé l'étude préliminaire, et a confirmé, sur l'étude de cas considérée, un autre résultat précédemment observé à savoir l'influence prépondérante de la taille de population par rapport aux deux autres paramètres. Plus cette taille est proche du front de Pareto optimal (la centaine dans le cas étudié), plus la convergence semble rapide. L'analyse des résultats n'a pas pu être approfondie, car les différences observées étaient faibles, et non significatives au regard de la variabilité induite par la stochasticité inhérente aux processus évolutionnaires. De plus, l'influence de ce caractère aléatoire, jugée non prioritaire vis-à-vis d'autres aspects, a été étudiée de manière plutôt

qualitative, en raison d'un coût de calculs élevé. La modification à cinq reprises et sur deux variantes de la graine du générateur de nombres aléatoires a permis d'illustrer qu'une variabilité non négligeable peut exister lors des premières générations mais qu'elle s'estompe au fil du processus, et devient peu discriminante à la fin de celui-ci.

❖ Conclusion sur le chapitre 4

Le chapitre 4 a présenté la contribution apportée au développement collectif d'une plateforme globale de conception des bâtiments. Les objectifs de la thèse, visant à associer plusieurs composants logiciels pour disposer d'un outil permettant d'assister le plus largement possible le concepteur dans ses choix, a effectivement nécessité de suivre et souvent de participer à la majorité des développements ayant eu lieu depuis le début de la thèse. La modélisation proposée a été couplée de manière fonctionnelle à deux extensions d'outils commerciaux afin de pouvoir diffuser plus rapidement ces développements aux professionnels du secteur, même si des verrous sur la variation automatisée de certains paramètres liées à la géométrie du bâtiment existent pour l'heure. Dans cette optique, un soin particulier a été porté sur l'automatisation et le caractère générique des scripts développés, ce qui a représenté un fort investissement en temps de travail. Le chapitre 4 a eu pour ambition de transmettre au lecteur une vision d'ensemble de la plateforme, en mettant en évidence l'articulation et l'interopérabilité des outils de simulation avec l'outil statistique *R*, orchestrateur de la plateforme. À notre connaissance, il s'agit de la seule plateforme de conception optimisée existante, réunissant au sein de la même architecture logicielle, techniques d'optimisation multicritère, méthodes d'analyses de sensibilité et d'incertitudes, outils de simulation thermique dynamique et d'analyse de cycle de vie des bâtiments, modélisation stochastique du comportement des occupants, et scénarios climatiques prospectifs. Cela constitue selon nous une des contributions majeures de ces travaux de thèse à la problématique de l'écoconception de maisons à énergie positive définie comme sujet de départ. À travers cette présentation est également illustré le relatif haut degré d'avancement obtenu pour un prototype d'outil de recherche, dépassant la preuve de concept informatique, et justifiant donc que sa refonte vers une version commercialisable soit actuellement en cours.

❖ Conclusion sur le chapitre 5

Le cinquième et dernier chapitre de la thèse correspond à l'application de la démarche sur une étude de cas réelle. Via une collaboration avec un constructeur de maisons individuelles dans le cadre du projet COMEPOS, la démarche a effectivement été testée lors d'un processus de conception intégrée incluant chercheurs, industriels et constructeurs. Si dans la première

partie de la thèse, il n'a pas été possible d'appliquer pleinement la démarche (les développements informatiques n'étaient pas encore achevés), l'étude de cas a été poursuivie de manière à déployer la démarche dans son ensemble (ASAI inclus), en mettant davantage les résultats en relief.

Il semble tout d'abord qu'en matière de mise en œuvre opérationnelle, l'aide à la décision assistée par optimisation multicritère proposée semble tout à fait possible au vu des temps d'exécution constatés (entre 2 et 3 heures pour l'étude de cas considérée) mais aussi de la qualité des résultats obtenus, d'autant que des accélérations sont possibles via un meilleur réglage des paramètres propres de l'algorithme génétique NSGA-II. L'expérience de la collaboration menée avec l'architecte responsable du projet a par ailleurs mis en évidence toute l'importance d'un processus itératif et graduel, où l'outil d'optimisation et le concepteur se guident mutuellement vers une exploration plus pertinente du champ des possibles. Très concrètement, plusieurs résultats d'optimisation ont permis d'orienter l'architecte dans ses choix. À l'inverse, par l'établissement d'un cahier des charges intégrant les différents degrés de liberté et contraintes du projet, l'architecte a permis de réduire significativement les espaces de recherche explorés.

En matière de degré de robustesse de la démarche, des méthodologies originales ont été mises en œuvre pour étudier, selon deux aspects, la problématique de la longue durée de vie des bâtiments. Un modèle stochastique de comportement des occupants a permis d'appréhender l'ordre de grandeur de l'influence générée par le changement de type du ménage occupant la maison. Une approche similaire a été mise en place avec la création de fichiers météorologiques prospectifs, selon deux scénarios du GIEC, pour évaluer le risque de non-robustesse d'une décision à l'évolution prévisible du climat jusqu'à la fin du siècle. Il ressort, suite à ces études, que les performances sont généralement affectées significativement, et qu'une modification en matière de choix de conception est possible. La disponibilité et la qualité des données apparaissent également comme essentielles pour des prévisions plus fiables à long terme. Ces études ont permis d'apporter des éléments méthodologiques pour faire progresser le processus de conception vers une aide à la décision plus pertinente sur le cycle de vie du bâtiment, et constituent aussi un premier pas vers l'optimisation robuste.

En conclusion du travail effectué, cette thèse peut être principalement vue comme un assemblage de briques élémentaires préexistantes ou développées au cours de la thèse ayant permis d'élaborer puis d'étudier des méthodologies originales dans le but de contribuer à la production de connaissances sur l'aide à la décision pour l'écoconception de maisons à énergie positive.

PERSPECTIVES

Naturellement, les travaux entrepris dans cette thèse correspondent à une réflexion en mouvement et non arrêtée sur une problématique complexe bien qu'appliquée. Nous esquissons ci-après quelques perspectives pour les contributions à venir sur le sujet, en signalant qu'elles pourront généralement être reliées à l'un ou l'autre des axes suivants :

- développer le caractère opérationnel de la démarche ;
- et développer son degré de robustesse.

Au sein du cadre commun de définitions d'un BEPOS, un bilan entre énergies consommée et produite a été retenu dans ces travaux, dans une approche en conception centrée sur le bâtiment. Il serait aussi intéressant d'établir ce bilan entre énergies importée et exportée, ce qui permettrait par exemple d'évaluer la part d'énergie autoconsommée, au niveau du bâtiment ou du quartier dans lequel il est implanté, mais plus généralement d'étudier les interactions entre le bâtiment et le réseau, ce qui constitue une problématique pour les gestionnaires. Le niveau d'incertitudes sur les profils horaires voire infra-horaires sera dans ce cas à prendre en compte.

Par rapport à l'unité fonctionnelle initialement posée, seules les émissions de GES ont été intégrées dans l'étude de cas, la consommation d'eau et la production de déchets ayant été omises, dans un souci de faciliter l'illustration de la démarche et l'analyse des résultats. Les développements informatiques réalisés permettant tout à fait l'intégration d'un nombre plus élevé de critères (notamment d'indicateurs environnementaux sur la santé et la biodiversité) dans la formulation du problème d'optimisation, il nous semble important de mener des études complémentaires qui considéreraient une extension de l'espace des objectifs, pour une identification et une interprétation plus pertinente des solutions non-dominées. L'application de méthodes d'aide multicritère à la décision pourrait s'avérer intéressante, lorsque, en dimension plus grande, il devient plus délicat de faire des choix dans les compromis disponibles. La problématique du confort d'été, peu abordée dans ces travaux mais dont l'importance croissante a été montrée par la prise en compte de l'évolution du climat, constitue un champ laissé ouvert par cette thèse, et nous semblant particulièrement pertinent à étudier de manière approfondie.

L'extension de l'espace des décisions se positionne au même titre que celle de l'espace des objectifs, comme un autre prolongement intéressant à ces travaux. Des obstacles logiciels peuvent à l'heure actuelle être rencontrés sur la variation automatisée de certains paramètres liés à la géométrie du bâtiment (dimensions globales du bâtiment, système d'isolation par l'intérieur ou l'extérieur...). En revanche, les systèmes de chauffage, la nature des isolants, le dimensionnement des protections solaires, les équipements (ECS solaire, PAC...)

ou encore l'orientation des panneaux photovoltaïques sont autant d'exemples de paramètres de conception facilement implémentables dans la version actuelle de la plateforme développée.

En ce qui concerne la modélisation, l'usage d'un modèle stochastique de comportement des occupants a permis de progresser vers des scénarios plus réalistes que les scénarios conventionnels largement utilisés. Néanmoins, l'élaboration de scénarios moyens à partir de l'ensemble des scénarios générés par le modèle présente l'inconvénient d'une approche moyenne, à savoir « atténuer » les effets extrêmes, même si elle répond à la contrainte de ne pouvoir simuler qu'un seul ménage dans le processus d'optimisation. Dans cette optique, et tout en respectant cette contrainte, il nous semble tout particulièrement intéressant d'étudier les possibilités de créer des scénarios d'usage « types », à l'image des fichiers météorologiques « types » déjà existants (ex. les fichiers TRY). Outre être issus de statistiques réelles, ces scénarios offriraient l'avantage d'être représentatifs de « vrais » ménages.

Si une démarche de validation empirique a été menée dans ces travaux pour étudier la fiabilité d'un modèle de STD dans le contexte des bâtiments performants, et que les résultats sont cohérents et rassurants par rapport à d'autres études précédemment réalisées, nous ne pouvons qu'encourager l'entreprise de démarches voisines qui porteraient sur les modèles d'ACV (Pannier et al. 2016). Pour disposer d'une aide à la décision robuste, il est effectivement nécessaire de maîtriser le niveau d'incertitudes de l'ensemble de la chaîne logicielle mise en œuvre. Dans cette optique, les analyses de sensibilité et d'incertitudes permettant d'étudier l'influence de paramètres, d'hypothèses ou de modèles de calcul sur l'évaluation des performances et *a fortiori* sur la nature des solutions obtenues en optimisation, doivent être poursuivies.

Avec un nombre croissant de paramètres de conception pouvant être étudiés, les analyses de sensibilité seront probablement utilisées plus régulièrement à l'avenir, dans le but de réduire la combinatoire de problèmes d'optimisation trop vastes. Si l'idée est séduisante, il convient toutefois de confirmer que les modèles de simulation thermique dynamique et d'analyse de cycle de vie des bâtiments ne correspondent pas à des contre-exemples (Chabin et al. 2015a; Chabin et al. 2015b) de l'association généralement favorable mais pouvant être trompeuse d'une approche moyenne (l'AS) avec une approche locale (l'optimisation).

Le chapitre 3 a initié l'étude du paramétrage de l'algorithme NSGA-II, ouvrant la voie à de nombreux travaux complémentaires, que ce soit sur le caractère opérationnel de la démarche ou sur sa robustesse. Tout d'abord, il semble intéressant d'étudier, sur la base du retour d'expérience disponible dans ces travaux de thèse, l'intérêt d'associer plusieurs indicateurs de performance pour

évaluer, de manière moins biaisée, le fonctionnement d'un algorithme ou d'une variante d'algorithme. Par exemple, le taux de doublons nous a semblé avantageusement compléter la vision globale mais pouvant être trompeuse, de l'hypervolume. Cette réflexion menée, un budget calculatoire plus important pourrait être accordé, de manière à permettre la mise en place d'une méthode de paramétrage plus avancée que celle appliquée dans ces travaux (plans d'expérience de Box et Benhken) sur la même étude de cas. Outre l'analyse du meilleur réglage identifié voire de tendances qui pourraient se dégager, il conviendra alors d'étudier la question suivante : est-ce que ce réglage est encore optimal ou du moins efficace dans d'autres conditions d'application de l'algorithme (type de bâtiment, type de fonctions objectifs, types de paramètres de conception, etc.) ? Si oui, dans quelle mesure ? Dans le cas contraire, l'étude de paramètres adaptatifs ou auto-adaptatifs semble être la piste la plus prometteuse pour éviter au concepteur cette opération délicate du réglage de l'algorithme. Par rapport au travail exploratoire réalisé dans ces travaux, le taux de doublons semble à ce titre pouvoir présenter un intérêt dans la construction d'une taille de population (auto)adaptative. En parallèle à ce cheminement, la construction d'un critère d'arrêt basé sur la vitesse de convergence d'un indicateur de performance (p. ex. l'hypervolume de par sa propriété de monotonie), mais restant soumis à un nombre maximal de générations (pour laisser à l'utilisateur la maîtrise du budget calculatoire de son processus d'optimisation) nous semble également apporter un plus indéniable dans l'utilisation pratique de l'optimisation par algorithme génétique proposée. Enfin, l'introduction d'individus « experts » dans la population initiale pourra être également explorée : l'objectif est d'accélérer la recherche, mais il faudra aussi veiller à ne pas trop l'orienter.

Un autre pan de perspectives concerne l'étude de métamodèles (par krigeage, polynôme de chaos...), pouvant être construits à partir de points échantillonnés d'un modèle plus détaillé mais aussi, d'après des bases de données émergentes (cadastre énergétique), ce qui relève de la problématique appelée communément « *Big Data* ». Tout l'enjeu dans ce genre d'approche est de savoir si la contrepartie d'un gain très important en temps de calcul ne nuit pas outre mesure à la robustesse des résultats. En effet, la perte de précision ne doit pas compromettre la robustesse de l'optimisation.

D'un point de vue des développements informatiques, il nous apparaît plus efficace de disposer de fonctions évolutives directement codées sous l'environnement de développement *R*, facilement adaptables à d'autres outils logiciels.

Sur des aspects plus appliqués, l'élaboration et la mise à disposition de scénarios climatiques prospectifs pour l'ensemble des stations de référence en France ainsi que d'une base de données de coûts moyens (à l'instar des fiches

environnementales) seraient des contributions concrètes pour faire évoluer les outils professionnels.

Terminons cette conclusion, et ce manuscrit, par la citation ci-dessous, en adéquation avec la hauteur de vue qu'il nous semble nécessaire de prendre sur ce travail de thèse. Cette citation nous rappelle que la valeur multidimensionnelle des bâtiments, en partie qualitative, rend vaine toute idée de croire qu'une démarche d'optimisation à elle seule puisse proposer des concepts pertinents de maisons à énergie positive. Ces approches basées sur l'optimisation doivent en effet être au service du concepteur, en proposant un support d'échanges sur certains aspects techniques, et pas davantage.

« Last, it may be worth to question how the nature of design may change, shifting from a scenario-by-scenario conventional design approach, to evolutionary optimization. As simulation begins to determine the character or quality of architecture, the human component may be marginalized. The design sensibility of architects coupled to their unique ability to relate design to social and cultural factors needs to temper the power of performance related computing » (Naboni et al. 2013).

Références bibliographiques

- ADEME. 2013. « Les chiffres clé du bâtiment - Edition 2013 ». Agence De l'Environnement et Maitrise de l'Energie.
- Armand Decker, S. 2015. « Développement d'une méthode d'optimisation multiobjectif pour la construction bois: prise en compte du confort des usagers, de l'impact environnemental et de la sécurité de l'ouvrage ». Université de Bordeaux. <http://www.theses.fr/2015BORD0189>.
- ASHRAE. 2001. *ANSI-ASHRAE standard 140-2001, standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs*.
- Association Effinergie. 2015. « Règles techniques applicables aux bâtiments faisant l'objet d'une demande de label Bepos Effinergie - Version 3 - 8 septembre 2015 ». http://www.effinergie.org/web/images/label/Bepos/20150908_R%C3%A8gles_techniques_Bepos_Effinergie_2013-V3.pdf.
- Athienitis, A.K., O'Brien, W., et Ernst, W. 2015. *Modeling, design, and optimization of net-zero energy buildings*. Wiley Online Library. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783433604830.fmatter/summary>.
- Attia, S., Hamdy, M., O'Brien, W., et Carlucci, S. 2013a. « Computational optimisation for zero energy buildings design: interviews results with twenty eight international experts ». In *Proceedings of the 13th International Conference of the IBPSA*, 978–984. Chambéry, France. <http://task1.iea-shc.org/data/sites/1/publications/T40A52-Computational-Optimisation-978.pdf>.
- . 2013b. « Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design ». *Energy and Buildings* 60 (mai): 110–24. doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.016.
- Bacot, P., Neveu, A., et Sicard, J. 1984. « Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment ». *Revue générale de thermique* 23 (267): 189–201.
- Baillargeon, S. 2007. « Programmation en R : incorporation de code C et création de packages ». Université de Laval. http://www.math.univ-montp2.fr/~pudlo/documents/ProgR_AppelC_Package_210607.pdf.
- Banos, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F.G., Gil, C., Alcayde, A., et Gómez, J. 2011. « Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (4): 1753–1766.
- Barichard, V. 2003. « Approches hybrides pour les problèmes multiobjectifs ». Université d'Angers. http://www.info.univ-angers.fr/pub/barichard/page_perso/publications/these/Barichard_these2003.pdf.

Références bibliographiques

- Belcher, S.E., Hacker, J.N., et Powell, D.S. 2005. « Constructing design weather data for future climates ». *Building Services Engineering Research and Technology* 26 (1): 49–61.
- Bellman, R. 1957. « E. 1957. Dynamic Programming ». *Princeton University Press. Bellman Dynamic programming 1957.*
- Ben Hamida, S. 2001. « Algorithmes évolutionnaires: prise en compte des contraintes et application réelle ». <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=14179408>.
- Berthiau, G. et Siarry, P. 2001. « État de l'art des méthodes "d'optimisation globale" ». *RAIRO-Operations Research* 35 (03): 329–365.
- Beyer, H.-G. et Deb, K. 2001. « Self-adaptive genetic algorithms with simulated binary crossover ». Universität Dortmund. <https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/5370>.
- Bichiou, Y. et Krarti, M. 2011. « Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings ». *Energy and Buildings* 43 (12): 3373–3382.
- Bontemps, S. 2015. « Validation expérimentale de modèles: application aux bâtiments basse consommation ». Thèse de doctorat, Université de Bordeaux. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01271593/>.
- Bouchlaghem, N.M. et Letherman, K.M. 1990. « Numerical optimization applied to the thermal design of buildings ». *Building and environment* 25 (2): 117–124.
- Box, G.E., Hunter, J.S., et Hunter, W.G. 2005. *Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery*. Vol. 2. Wiley-Interscience New York. <http://stats.cwslive.wiley.com/details/book/2791421/Statistics-for-Experimenters-Design-Innovation-and-Discovery-2nd-Edition.html>.
- 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. AICVF-AITF-ARMINES.
- Breitfeld, J. 2015. « Passive House - the next decade ». *Passipedia - The Passive House Resource*. mars 27. http://passipedia.org/basics/passive_house_-_assuring_a_sustainable_energy_supply/passive_house_the_next_decade#references.
- Brownlee, A.E., Wright, J.A., et Mourshed, M.M. 2011. « A multi-objective window optimisation problem ». In *Proceedings of the 13th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation*, 89–90. ACM. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2001910>.
- Brun, A., Spitz, C., et Wurtz, E. 2009. « Analyse du comportement de différents codes de calcul dans le cas de bâtiments à haute efficacité énergétique ». In *IXeme colloque interuniversitaire Franco-québécois sur la thermique des systemes*. http://www.lamaisonpassive.fr/forum/publi_CIFQ_2009.pdf.
- Caldas, L. 2008. « Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE_ARCH: An evolution-based generative design system ». *Advanced Engineering Informatics* 22 (1): 59–70.

- Campolongo, F., Cariboni, J., et Saltelli, A. 2007. « An effective screening design for sensitivity analysis of large models ». *Environmental Modelling & Software* 22 (10): 1509-18. doi:10.1016/j.envsoft.2006.10.004.
- Cao, S., Hasan, A., et Sirén, K. 2013. « Analysis and solution for renewable energy load matching for a single-family house ». *Energy and buildings* 65: 398–411.
- Carlucci, S., Cattarin, G., Causone, F., et Pagliano, L. 2015. « Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) ». *Energy and Buildings* 104: 378–394.
- Carnell, R. 2016. « Package “lhs” ». CRAN. <https://cran.r-project.org/web/packages/lhs/lhs.pdf>.
- Castro-Lacouture, D., Sefair, J.A., Flórez, L., et Medaglia, A.L. 2009. « Optimization model for the selection of materials using a LEED-based green building rating system in Colombia ». *Building and Environment* 44 (6): 1162–1170.
- CEA. 2010. « Plateforme INCAS, description des bâtiments test et des éléments et systèmes contenus ». Projet ANR HABISOL 2008 SIMINTHEC L1-1.
- CEN. 2013. *prEN 15603:2013 Energy performance of buildings - Overarching standard EPBD*.
- Chabin, T., Tonda, A., et Lutton, E. 2015a. « How to Mislead an Evolutionary Algorithm Using Global Sensitivity Analysis ». In *International Conference on Artificial Evolution (Evolution Artificielle)*, 44–57. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-31471-6_4.
- . 2015b. « Is Global Sensitivity Analysis Useful to Evolutionary Computation? » In *Proceedings of the Companion Publication of the 2015 on Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 1365–1366. ACM. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2764675>.
- Chantrelle, F.P., Lahmidi, H., Keilholz, W., Mankibi, M.E., et Michel, P. 2011. « Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings ». *Applied Energy* 88 (4): 1386–1394.
- Chelouah, R. 2000. « Adaptation aux problèmes à variables continues de plusieurs métaheuristiques d’optimisation combinatoire: la méthode tabou, les algorithmes génétiques et les méthodes hybrides. Application en contrôle non destructif ». Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=206774>.
- Chouquet, J. 2007. « Development of a method for building life cycle analysis at an early design phase - Implementation in a tool - Sensitivity and uncertainty of such a method in comparison to detailed LCA Software ». Thèse de doctorat, Karlsruhe: Université de Karlsruhe.
- Collette, Y. et Siarry, P. 2002. *Optimisation multiobjectif*. Editions Eyrolles.
- Crutzen, P.J. 2002. « Geology of mankind ». *Nature* 415 (6867): 23-23. doi:10.1038/415023a.
- CSTB. 2013. « Manuel d’utilisation de progiciel Elodie V2 ».
- Cukier, R.I., Levine, H.B., et Shuler, K.E. 1978. « Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems ». *Journal of computational physics* 26 (1): 1–42.

- CYCLEco. 2014. « Méthode d'évaluation environnementale du bâtiment e-LICCO ».
- Dantzig, G.B. 1951. « Maximization of a linear function of variables subject to linear inequalities ». In *Activity Analysis of Production and Allocation*, 339-47. Koopmans (T. C.). <http://www.citeulike.org/group/1692/article/576839>.
- Darwin, C. 1859. « On the origins of species by means of natural selection ». *London: Murray* 247. <http://sciencestudies.pbworks.com/f/OoS.pdf>.
- Davis, D. 2013. « Modelled on software engineering: Flexible parametric models in the practice of architecture ». RMIT University.
- Davis, L. 1985. « Applying adaptive algorithms to epistatic domains. » In *IJCAI*, 85:162–164. <http://www.academia.edu/download/31912649/029.pdf>.
- De Jong, K. 2007. « Parameter Setting in EAs: a 30 Year Perspective ». In *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms*. Fernando G. Lobo, Cláudio F. Lima, Zbigniew Michalewicz.
- Deb, K. 2001. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Vol. 16. John Wiley & Sons. <http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=OSTn4GSy2uQC&oi=fnd&pg=PR15&dq=multi+objective+optimization+using+evolutionary+algorithms&ots=tEftotHqe7&sig=wUdnh2HXoKK2wKTeeJotiyBUHjw>.
- Deb, K. et Agrawal, R.B. 1995. « Simulated binary crossover for continuous search space ». *Complex systems* 9 (2): 115–148.
- Deb, K. et Agrawal, S. 1999. « Understanding Interactions among Genetic Algorithm Parameters* ». *Foundations of genetic Algorithms V, San Mateo, CA*, 265-86.
- Deb, K. et Goyal, M. 1996. « A combined genetic adaptive search (GeneAS) for engineering design ». *Computer Science and Informatics* 26: 30–45.
- Deb, K. et Jain, S. 2002. « Running performance metrics for evolutionary multi-objective optimization ». <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.9.159>.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., et Meyarivan, T. 2002a. « A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II ». *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 6 (2): 182–197.
- . 2002b. « A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II ». *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 6 (2): 182–197.
- Demanuele, C., Tweddell, T., et Davies, M. 2010. « Bridging the gap between predicted and actual energy performance in schools ». In *World renewable energy congress XI*, 25–30. <http://www.cibse-sdg.org/resources/files/e2bfaea.pdf>.
- Disch. 2008. « Das Plusenergiehaus ». Site internet. <http://www.plusenergiehaus.de/>.
- Doaré, G. 2012. « Chloé, maison passive exemplaire ». *Habitat Naturel*. <http://www.maisonpassive-chloe.com/pdf/Chloe-habitat%20naturel.pdf>.
- Dorigo, M. 1992. « Optimization, learning and natural algorithms ». *Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy*. <http://ci.nii.ac.jp/naid/10016599043/>.

- Downing, D.J., Gardner, R.H., et Hoffman, F.O. 1985. « An examination of response-surface methodologies for uncertainty analysis in assessment models ». *Technometrics* 27 (2): 151–163.
- Dréo, J., Petrowski, A., Siarry, P., et Taillard, E. 2003. *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile. Recuit simulé, recherché avec tabous, algorithmes évolutionnaires et algorithmes génétiques, colonies de fourmis*. Eyrolles.
- Droesbeke, J.-J., Saporta, G., et Fine, J. 1997. *Plans d'expériences: applications à l'entreprise*. Editions technip.
- Duforestel, T. 2008. « Les outils de modélisation énergétique des bâtiments très basse consommation ». <http://www.valerie.urbicoop.eu/documentation/duforestel-bs08-les-outils-de-modlisation-nergtique-.pdf>.
- Duret, D., Wurtz, F., Gerbaud, L., Bergeon, S., et Cogitore, B. 2006. « Operational Tolerance Study using Local and Global Deterministic Algorithms ». In *Optimization and Inverse Problem in Electromagnetism*, 2–pages. <http://hal.univ-grenoble-alpes.fr/hal-00196685/>.
- Eberhart, R. et Kennedy, J. 1995. « A new optimizer using particle swarm theory ». In *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*, 39–43. IEEE. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/494215/>.
- Ecofys, Politecnico di Milano, et University of Wuppertal. 2013. « Towards Nearly Zero-Energy Buildings. Definition of Common Principles under the EPBD ». Final report. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb_full_report.pdf.
- Eiben, Á.E. et Jelasity, M. 2002. « A critical note on experimental research methodology in EC ». In *wcci*, 582–587. IEEE.
- Eiben, A.E., Michalewicz, Z., Schoenauer, M., et Smith, J.E. 2007. « Parameter Control in Evolutionary Algorithms ». In *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms*. Fernando G. Lobo, Cláudio F. Lima, Zbigniew Michalewicz.
- Eiben, A.E. et Smit, S.K. 2011. « Parameter Tuning for Configuring and Analyzing Evolutionary Algorithms ». *Swarm and Evolutionary Computation* 1 (1): 19-31.
- Ellis, P.G., Griffith, B., Long, N., Torcellini, P., et Crawley, D. 2006. « Automated Multivariate Optimization Tool for Energy Analysis ». In *Proceedings SimBuild*. Cambridge, MA. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.123.152&rep=rep1&type=pdf>.
- EPBD. 2010. « The Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) ». *Official Journal Of the European Union*, L153.
- Eshelman, L.J. et Schaffer, J.D. 1993. « Real-Coded Genetic Algorithms and Interval-Schemata ». In *Foundations of Genetic Algorithms* 2, 187-202.
- Evins, R. 2013. « A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22: 230–245.

Références bibliographiques

- Evins, R., Pointer, P., Vaidyanathan, R., et Burgess, S. 2012. « A case study exploring regulated energy use in domestic buildings using design-of-experiments and multi-objective optimisation ». *Building and Environment* 54: 126–136.
- Faivre, R., Iooss, B., Mahévas, S., Makowski, D., et Monod, H. 2013. *Analyse de sensibilité et exploration de modèles: Application aux sciences de la nature et de l'environnement*. Editions Quae.
- Faure, H. 1992. « Good permutations for extreme discrepancy ». *Journal of Number Theory* 42 (1): 47–56.
- Favre, B. 2013. « Etude de stratégies de gestion énergétique des bâtiments par l'application de la programmation dynamique ». Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris. <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00957327>.
- Feist, W. 1993. « Passive Houses in Central Europe ». Thèse de doctorat, University of Kassel.
- Feist, W. 2015. « The PER sustainability assessment ». *Passipedia - The Passive House Resource*. septembre 12. http://passipedia.org/certification/passive_house_categories/per#literature.
- Feo, T.A. et Resende, M.G. 1989. « A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem ». *Operations research letters* 8 (2): 67–71.
- Firth, S.K., Lomas, K.J., et Wright, A.J. 2010. « Targeting Household Energy-Efficiency Measures Using Sensitivity Analysis ». *Building Research & Information* 38 (1): 25–41. doi:10.1080/09613210903236706.
- Floissac, L. 2011. « COCON - Comparaison de solutions Constructives, de Confort et d'émissions de CO2 ».
- Flory-Celini, C. 2008. « Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant ». Université Lyon 1 Claude Bernard. <http://researchers.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Innovation/theses/TheseFloryCelini.pdf>.
- Fonseca, C.M., Paquete, L., et Lopez-Ibanez, M. 2006. « An Improved Dimension-Sweep Algorithm for the Hypervolume Indicator ». In *2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 1157–63. doi:10.1109/CEC.2006.1688440.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Hischer, R., Doka, G., Dones, R., Heck, T., et al. 2007. « Overview and methodology. Data v2. 0 (2007). Ecoinvent report No. 1 ». Ecoinvent Centre, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Dübendorf (Switzerland). http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/028/41028087.pdf.
- G. Lobo, F. et F. Lima, C. 2007. « Adaptive Population Sizing Schemes in Genetic Algorithms ». In *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms*. Parameter Setting in Evolutionary Algorithms.
- Garde, F., David, M., Lenoir, A., et Ottenwelter, E. 2011. « Towards Net Zero Energy Buildings in Hot Climates: Part 1, New Tools and Methods. » *ASHRAE transactions* 117 (1).
- Garde, F. et Donn, M. 2014. « Solution Sets and Net Zero Energy Buildings - A review of 30 Net ZEBs case studies worldwide ». Technical report. AIE Tâche

- 40 / Annexe 52 « Towards Net Zero Energy Solar Buildings ». <http://task40.iea-shc.org/data/sites/1/publications/T40A52-DC-TR1-30-Net-ZEBs.pdf>.
- GEA. 2012. *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria. www.globalenergyassessment.org.
- Glover, F. 1989. « Tabu search—part I ». *ORSA Journal on computing* 1 (3): 190–206.
- . 1990. « Tabu search—part II ». *ORSA Journal on computing* 2 (1): 4–32.
- Glover, F., Laguna, M., et Martí, R. 2000. « Fundamentals of scatter search and path relinking ». *Control and cybernetics* 29 (3): 653–684.
- Goedkoop, M. et Spriensma, R. 2001. « The eco-indicator99: A damage oriented method for life cycle impact assessment: Methodology report ». <http://www.citeulike.org/group/13799/article/11785193>.
- Goel, T. et Stander, N. 2010. « A study on the convergence of multiobjective evolutionary algorithms ». In *Preprint submitted to the 13th AIAA/ISSMO conference on Multidisciplinary Analysis Optimization*, 1–18.
- Goetzberger, A., Bopp, G., Griesshaber, W., et Stahl, W. 1993. « The PV/hydrogen/oxygen-system of the self-sufficient solar house Freiburg ». In *Photovoltaic Specialists Conference, 1993., Conference Record of the Twenty Third IEEE*, 1152–1158. Rancho Mirage, CA, USA: IEEE. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=346960.
- Goetzberger, A., Stahl, W., Bopp, G., Heinzel, A., et Voss, K. 1994. « The self-sufficient solar house Freiburg ». *Advances in Solar Energy* 9. <http://www.osti.gov/scitech/biblio/245114>.
- Goffart, J. 2013. « Impact de la variabilité des données météorologiques sur une maison basse consommation. Application des analyses de sensibilité pour des entrées temporelles. » Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- Goldberg, D.E. 1989. *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*. Vol. 412. Addison-wesley Reading Menlo Park. <https://pdfs.semanticscholar.org/2e62/d1345b340d5fda3b092c460264b9543bc4b5.pdf>.
- Grefenstette, J.J. 1986. « Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms ». *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics* 16(1), février, 122–28.
- Grubler, A. 2008. « Energy transitions ». *Encyclopedia of Earth*. Washington, DC: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment.
- Guinée, J.B. 2002. « Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 7 (5): 311–13. doi:10.1007/BF02978897.
- Halton, J.H. 1960. « On the efficiency of certain quasi-random sequences of points in evaluating multi-dimensional integrals ». *Numerische Mathematik* 2 (1): 84–90.
- Hamdy, M., Hasan, A., et Siren, K. 2009. « Combination of optimization algorithms for a multi-objective building design problem ». In *IBPSA: 11th International*

Références bibliographiques

- Building Performance Simulation Association Conference, Glasgow-UK.*
https://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_0173_179.pdf.
- . 2011. « Applying a multi-objective optimization approach for Design of low-emission cost-effective dwellings ». *Building and environment* 46 (1): 109–123.
- Hamdy, M., Palonen, M., et Hasan, A. 2012. « Implementation of pareto-archive NSGA-II algorithms to a nearly-zero-energy building optimisation problem ». In *Proceedings of the building simulation and optimization conference*. <http://www.ibpsa.org/proceedings/BSO2012/3A3.pdf>.
- Hasan, A., Vuolle, M., et Sirén, K. 2008. « Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation ». *Building and Environment* 43 (12): 2022–2034.
- Hastie, T.J. et Tibshirani, R.J. 1990. *Generalized additive models*. Vol. 43. CRC Press.
- Heinze, M. et Voss, K. 2009. « Goal: Zero Energy Building exemplary experience based on the solar estate solarsiedlung freiburg am schlierberg, Germany ». *Journal of Green Building* 4 (4): 93–100.
- Heiselberg, P., Brohus, H., Hesselholt, A., Rasmussen, H., Seinre, E., et Thomas, S. 2009. « Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings ». *Renewable Energy* 34 (9): 2030–36. doi:10.1016/j.renene.2009.02.016.
- Helton, J.C. et Davis, F.J. 2003. « Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems ». *Reliability Engineering & System Safety* 81 (1): 23–69.
- Herfray, G. 2011. « Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris. <http://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00658220/>.
- Herfray, G. 2011. « Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris. <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00658220>.
- Hoffmeister, F. et Bäck, T. 1990. « Genetic algorithms and evolution strategies: Similarities and differences ». In *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, 455–469. Springer.
<http://link.springer.com/chapter/10.1007/BFb0029787>.
- Holland, J.H. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press. <http://doi.apa.org/psycinfo/1975-26618-000>.
- Homma, T. et Saltelli, A. 1995. « Use of Sobol's quasirandom sequence generator for integration of modified uncertainty importance measure ». *Journal of Nuclear Science and Technology* 32 (11): 1164–1173.
- Hooke, R. et Jeeves, T.A. 1961. « "Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problems ». *Journal of the ACM (JACM)* 8 (2): 212–229.
- Hopfe, C.J., Emmerich, M.T., Marijt, R., et Hensen, J. 2012. « Robust multi-criteria design optimisation in building design ». In *Proceedings of the building simulation and optimization conference, Loughborough, UK*.
<http://www.ibpsa-england.org/resources/files/bs0-2012/1A3.pdf>.
- Hutter, F., Hoos, H.H., Leyton-Brown, K., et Stützle, T. 2009. « ParamILS: an automatic algorithm configuration framework ». *Journal of Artificial Intelligence Research* 36 (1): 267–306.

- Hutter, F., Hoos, H.H., et Stützle, T. 2007. « Automatic algorithm configuration based on local search ». In *AAAI*, 7:1152–1157.
- looss, B. 2009. « Analyses d'incertitudes et de sensibilité de modèles complexes- Applications dans des problèmes d'ingénierie ». présenté à Rencontres « Maths-Météo » Toulouse. http://www.math.univ-toulouse.fr/~baehr/meteo_SMAI/Pres/Pres_looss.pdf.
- . 2011. « Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques ». *Journal de la Société Française de Statistique* 152 (1): 3–25.
- . 2015. « Synthèse et enjeux de l'exploration numérique ». présenté à Formation Pec'Num - Réseau MEXICO, École Centrale de Lyon, mai 18. <http://gdr-mascotnum.fr/pecnum/>.
- 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*. IPCC, Geneva, Switzerland. <http://epic.awi.de/37530/>.
- ISO. 2012. « EN ISO 13790: Energy Performance of Buildings - Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling ».
- ISO 14 040. 2006. « Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Principes et cadres ».
- Jacques, J. 2005. « Contributions à l'analyse de sensibilité et à l'analyse discriminante généralisée ». Université Joseph-Fourier-Grenoble I. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011169/>.
- Jancovici, J.-M. 2013. « Combien suis-je un esclavagiste ? » *Manicore*. <http://www.manicore.com/documentation/esclaves.html>.
- . 2015. « Qu'est-ce que l'énergie, exactement ». *Manicore*. <http://www.manicore.com/documentation/energie.html>.
- Jensen, S.Ø. 1995. « Validation of building energy simulation programs: a methodology ». *Energy and Buildings* 22 (2): 133-44. doi:10.1016/0378-7788(94)00910-C.
- Jin, R., Chen, W., et Sudjianto, A. 2005. « An efficient algorithm for constructing optimal design of computer experiments ». *Journal of Statistical Planning and Inference* 134 (1): 268–287.
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., et Shaked, S. 2010. *Analyse du cycle de vie: Comprendre et réaliser un écobilan*. PPUR Presses polytechniques.
- Jones, G.A. et Warner, K.J. 2016. « The 21st century population-energy-climate nexus ». *Energy Policy* 93: 206–212.
- Judkoff, R. et Neymark, J. 1995. « International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method ». NREL/TP-472-6231. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/6231.pdf>.
- Judkoff, R. et Neymark, J. 2013. « Twenty years on!: updating the IEA BESTEST building thermal fabric test cases for ASHRAE standard 140 ». *Proceedings of BS2013*. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.363.1344&rep=rep1&type=pdf>.

- Judkoff, R., Wortman, D., O'Doherty, B., et Burch, J. 2008. « A Methodology for Validating Building Energy Analysis Simulations ». NREL/TP-550-42059. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
<http://www.stanford.edu/group/narratives/classes/08-09/CEE215/ReferenceLibrary/BIM%20and%20Building%20Simulation%20Research/A%20Methodology%20for%20Validating%20Building%20Energy%20Analysis%20Simulations.pdf>.
- Karaboga, D. 2005. « An idea based on honey bee swarm for numerical optimization ». Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department.
<https://pdfs.semanticscholar.org/cf20/e34a1402a115523910d2a4243929f6704db1.pdf>.
- Kilkis, B.I. 2006. « Cost optimization of a hybrid HVAC system with composite radiant wall panels ». *Applied Thermal Engineering* 26 (1): 10–17.
- Kilkis, S. 2007. « A new metric for net-zero carbon buildings ». In *ASME 2007 Energy Sustainability Conference*, 219–224. Long Beach, California, USA: American Society of Mechanical Engineers.
<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1603110>.
- Kirkpatrick, S. 1984. « Optimization by simulated annealing: Quantitative studies ». *Journal of statistical physics* 34 (5-6): 975–986.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P., et others. 1983. « Optimization by simulated annealing ». *science* 220 (4598): 671–680.
- Knowles, J. et Corne, D. 2002. « On metrics for comparing nondominated sets ». In , 1:711-16.
- Koza, J.R. 1992. *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*. Vol. 1. MIT press.
- Kung, H.-T., Luccio, F., et Preparata, F.P. 1975. « On finding the maxima of a set of vectors ». *Journal of the ACM (JACM)* 22 (4): 469–476.
- Kurnitski, J. 2013a. « Technical definition for nearly zero energy buildings ». *REHVA Journal*, mai.
- . 2013b. « Nearby use of renewable energy sources - an alternative for on-site production ». *REHVA Journal*, août.
- La Maison Passive. 2016. « Découvrez la Maison Chloé, première maison passive Plus de France ». mars 15. <http://www.lamaisonpassive.fr/wp/decouvrez-la-maison-chloe-premiere-maison-passive-plus-de-france/>.
- Lam, J.C., Wan, K.K., et Yang, L. 2008. « Sensitivity analysis and energy conservation measures implications ». *Energy Conversion and Management* 49 (11): 3170–3177.
- Larrañaga, P. et Lozano, J.A. 2001. *Estimation of distribution algorithms: A new tool for evolutionary computation*. Vol. 2. Springer Science & Business Media.
- Lebert, A. (coordination), ARMINES - CES, BYCN, CSTB, Fédération maisons de qualité, et IZUBA Energies. 2014. « Projet ANR BENEFIS : Bilan ENergétique et Environnemental Flable Simple et reproductible des bâtiments, Tâche 5 : diffusion et communication, Rapport final, ANR 2011 VILD 001 01, DEE/EICV - 14.100 ».

- Lefebvre, G. 1987. « Analyse et réduction modales d'un modèle de comportement thermique du bâtiment ». Thèse de doctorat, Paris VI: Université Pierre et Marie Curie.
- Lemieux, C. 2009. *Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Sampling*. Vol. 20. Springer. <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-0-387-78165-5.pdf>.
- Lenoir, A., Thellier, F., et Garde, F. 2011. « Towards Net Zero Energy Buildings in Hot Climate, Part 2: Experimental Feedback ». *ASHRAE Transactions* 117 (1). <http://www.task47.iea-shc.org/data/sites/1/publications/DC-TP7-Garde-2011-11.pdf>.
- Li, M., Zheng, J., et Wu, J. 2008. « Improving NSGA-II algorithm based on minimum spanning tree ». In *Simulated Evolution and Learning*, 170–179. Springer.
- Ligier, S., Robillart, M., Garnier, C., Schalbart, P., et Peuportier, B. 2016. « Etude d'un processus de garantie de performance énergétique : application à des logements collectifs ». In *IBPSA France 2016*, 8. Champs-sur-Marne, 23-24 Mai 2016.
- Lomas, K.J., Eppel, H., Martin, C.J., et Bloomfield, D.P. 1997. « Empirical validation of building energy simulation programs ». *Energy and buildings* 26 (3): 253–275.
- Lourenço, H.R., Martin, O.C., et Stützle, T. 2003. « Iterated local search ». In *Handbook of metaheuristics*, 320–353. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-48056-5_11.
- Luke, S., Balan, G.C., et Panait, L. 2003. « Population implosion in genetic programming ». In *Genetic and Evolutionary Computation—GECCO 2003*, 1729–1739. Springer.
- Lutton, E. 2004. « Darwinisme artificiel: une vue d'ensemble ». *Traitement du Signal, numéro spécial" Gestion intelligente de senseurs*. http://evelyne.lutton.free.fr/Papers/169_AE-RevueTSI.pdf.
- Macdonald, I.A. 2002. « Quantifying the effects of uncertainty in building simulation ». Thèse de doctorat, Glasgow, Scotland: University of Strathclyde. Dept. of Mechanical Engineering. https://www.strath.ac.uk/media/departments/mechanicalengineering/esru/research/phdmphilprojects/macdonald_thesis.pdf.
- Machairas, V., Tsangrassoulis, A., et Axarli, K. 2014. « Algorithms for optimization of building design: A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31: 101–112.
- Magnier, L. et Haghighat, F. 2010. « Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network ». *Building and Environment* 45 (3): 739–746.
- Marszal, A.J., Bourrelle, J.S., Musall, E., Heiselberg, P., Gustavsen, A., et Voss, K. 2010. « Net Zero Energy Buildings-Calculation Methodologies versus National Building Codes ». In *Proceedings of EuroSun*. Graz, Austria. http://www.task41.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Task40a-Net_Zero_Energy_Buildings_Calculation_Methods_and_Input_Variables.pdf.
- 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 ». *Energy and Buildings* 43 (4): 971–979.

Références bibliographiques

- Matheron, G. 1969. « Le Krigeage Universel: Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique ». École nationale supérieure des mines de Paris.
- McKay, M.D., Beckman, R.J., et Conover, W.J. 1979. « Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code ». *Technometrics* 21 (2): 239–245.
- . 2000. « A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code ». *Technometrics* 42 (1): 55–61.
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., et Behrens III, W.W. 1972. « The Limits to Growth: A Report for THE CLUB OF ROME'S Project on the Predicament of Mankind ». New York: Universe Books.
- Meadows, D., Randers, J., et Meadows, D. 2004. *Limits to growth: the 30-year update*. Chelsea Green Publishing.
- Merheb, R. 2013. « Fiabilité des outils de prévision du comportement des systèmes thermiques complexes ». Thèse de doctorat, Université de Bordeaux. <http://www.theses.fr/2013BOR14959>.
- Mersmann, O., Trautmann, H., Steuer, D., Bischl, B., et Deb, K. 2014. « Package "mco" - version 1.0-15.1 ». CRAN. <https://cran.r-project.org/web/packages/mco/mco.pdf>.
- MINERGIE. 2011. « Aide à l'utilisation Minergie-A - Version française ». Association MINERGIE. https://www.minergie.ch/tl_files/download_fr/Anwendungshilfe_ME-A-V1.0_fr.pdf.
- . 2013. « Règlement d'utilisation du produit Minergie-A selon norme SIA/1:2009 - Version française 2013 ». Association MINERGIE. http://www.minergie.ch/tl_files/download_fr/Justificatifs/Minergie-A/Reglement%20ME-A-2013-fr.pdf.
- . s. d. « Exigences MINERGIE ». *Site Internet de MINERGIE*. https://www.minergie.ch/minergie_fr.html.
- Mladenović, N. et Hansen, P. 1997. « Variable neighborhood search ». *Computers & operations research* 24 (11): 1097–1100.
- Montgomery, D.C. 2008. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.
- Moore, R.E., Bierbaum, F., et Schwiertz, K.-P. 1979. *Methods and applications of interval analysis*. Vol. 2. SIAM. <http://epubs.siam.org/doi/pdf/10.1137/1.9781611970906.fm>.
- Morris, M.D. 1991. « Factorial sampling plans for preliminary computational experiments ». *Technometrics* 33 (avril): 161–174. doi:10.2307/1269043.
- Moscato, P. 1989. « On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms ». *Caltech concurrent computation program, C3P Report* 826: 1989.
- Mousavi, S.M., Sadeghi, J., Niaki, S.T.A., et Tavana, M. 2016. « A Bi-Objective Inventory Optimization Model under Inflation and Discount Using Tuned Pareto-Based Algorithms: NSGA-II, NPGA, and MOPSO ». *Applied Soft Computing* 43 (juin): 57–72.
- Munaretto, F. 2014. « Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments ». Thèse de doctorat, École

- nationale supérieure des mines de Paris. <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01068784>.
- Murray, S.N., Walsh, B.P., Kelliher, D., et O'Sullivan, D.T.J. 2014. « Multi-variable optimization of thermal energy efficiency retrofitting of buildings using static modelling and genetic algorithms—A case study ». *Building and Environment* 75: 98–107.
- Musall, E., Weiss, T., Lenoir, A., Voss, K., Garde, F., et Donn, M. 2010. « Net Zero energy solar buildings: an overview and analysis on worldwide building projects ». In *EuroSun conference*. Graz, Austria. <http://www.task40.iea-shc.org/data/sites/1/publications/STC134895.pdf>.
- Myers, R. et Hancock, E.R. 2001. « Empirical modelling of genetic algorithms ». *Evolutionary computation* 9 (4): 461–493.
- Naboni, E., Maccarini, A., Korolija, I., et Zhang, Y. 2013. « Comparison of conventional, parametric and evolutionary optimisation approaches for the architectural design of nearly zero energy buildings ». <https://www.dora.dmu.ac.uk/xmlui/handle/2086/9153>.
- Nakićenović, N., Grübler, A., et McDonald, A. 1998. *Global energy perspectives*. International Institute For Applied Systems (IIASA) and World Energy Council (WEC). Cambridge, UK: Cambridge University Press Cambridge.
- Nannen, V., Smit, S.K., et Eiben, A.E. 2008. « Costs and Benefits of Tuning Parameters of Evolutionary Algorithms ». In *Parallel Problem Solving from Nature – PPSN X*, édité par Günter Rudolph, Thomas Jansen, Nicola Beume, Simon Lucas, et Carlo Poloni, 528–38. Lecture Notes in Computer Science 5199. Springer Berlin Heidelberg.
- Napolitano, A. et Lollini, R. 2011. « Measurement and verification protocol for net zero energy buildings ». technical report in subtask A of the IEA–SHC/ECBCS–Task40/Annex52–Towards Net Zero Energy Solar Buildings.
- Nelder, J.A. et Mead, R. 1965. « A simplex method for function minimization ». *The computer journal* 7 (4): 308–313.
- Neumaier, A. 1990. *Interval methods for systems of equations*. Vol. 37. Cambridge university press.
- Neymark, J., Judkoff, R., Knabe, G., Le, H.-T., Dürig, M., Glass, A., et Zweifel, G. 2002. « Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs ». *Energy and Buildings* 34 (9): 917–931.
- Nguyen, A.-T., Reiter, S., et Rigo, P. 2014. « A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis ». *Applied Energy* 113: 1043–1058.
- Niederreiter, H. 1978. « Quasi-Monte Carlo methods and pseudo-random numbers ». *Bulletin of the American Mathematical Society* 84 (6): 957–1041.
- Nielsen, T.R. 2002. « Optimization of buildings with respect to energy and indoor environment ». Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Department of Buildings and Energy Institut for Bygninger og Energi. http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:83390/datastreams/file_5275664/content.

Références bibliographiques

- Palomo Del Barrio, E. et Guyon, G. 2003. « Theoretical basis for empirical model validation using parameters space analysis tools ». *Energy and Buildings* 35 (10): 985-96. doi:10.1016/S0378-7788(03)00038-0.
- Palonen, M., Hasan, A., et Sirén, K. 2009. « A genetic algorithm for optimization of building envelope and HVAC system parameters ». In *Proc. Of the 11th IBPSA Conference, Glasgow, Scotland*. http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_0159_166.pdf.
- Panão, M.J.O., Gonçalves, H.J., et Ferrão, P.M. 2008. « Optimization of the urban building efficiency potential for mid-latitude climates using a genetic algorithm approach ». *Renewable Energy* 33 (5): 887-896.
- Pannier, M.-L., Schalbart, P., et Peuportier, B. 2016a. « Building life cycle assessment: investigation of influential parameters in a helpful decision tool ». In *Sustainable Built Environment Conference 2016 in Hamburg: Strategies, Stakeholders, Success factors*, 10. Hamburg, Allemagne, 7 au 11 mars 2016. doi:10.5445/IR/1000051699.
- . 2016b. « Identification de paramètres incertains influents en analyse de cycle de vie des bâtiments ». In *IBPSA France 2016*, 8. Champs-sur-Marne, France, 23-24 Mai 2016.
- Passipedia. 2016. « The new Passive House Classes ». *Passipedia - The Passive House Resource*. http://passipedia.org/certification/passive_house_categories#per_factors.
- Passive House Institute. 2015. « Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard ». http://passiv.de/downloads/03_building_criteria_en.pdf.
- Peippo, K., Lund, P.D., et Vartiainen, E. 1999. « Multivariate optimization of design trade-offs for solar low energy buildings ». *Energy and Buildings* 29 (2): 189-205.
- Pernodet Chantrelle, F. 2010. « Méthode d'optimisation multicritère de scénarios de réhabilitation de bâtiments tertiaires. Application à l'évaluation de dispositifs de rafraîchissement hybride. » Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- Peuportier, B. 1993. « COMFIE, logiciel pour l'architecture bioclimatique, quelques applications pour les vérandas ». In *Journée technique GENECE (CEA)*. Cadarache, 1993.
- Peuportier, B. 2005. « Bancs d'essais de logiciels de simulation thermique ». *Journée SFT-IBPSA «Outils de simulation thermoaérodynamique du bâtiment»*, La Rochelle. <http://perso.univ-lr.fr/fcherqui/IBPSAmars/textes/PM-04-Peuportier.pdf>.
- . 2008. *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*. Les Presses MINES ParisTech.
- . 2014. « Eco-conception des bâtiments et des quartiers ». *Techniques de l'ingénieur*.
- Peuportier, B., Aggeri, F., Aguilera, V., Aw, T., Houda, B., Chandakas, E., Combes, F., et al. 2013. *Ecoconception des ensembles bâtis et des infrastructures*. Presses de l'Ecole des Mines.

Références bibliographiques

- Peuportier, B. et Blanc-Sommereux, I. 1990. « Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings ». *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109-20. doi:10.1080/01425919008909714.
- Peuportier, B. et Herfray, G. 2012. « Evaluation of electricity related impacts using a dynamic LCA model ». In *International Symposium Life Cycle Assessment and Construction*. Nantes.
- Peuportier, B., Kellenberger, D., Anink, D., Mötzl, H., Anderson, J., Vares, S., Chevalier, J., et König, H. 2004a. « Inter-comparaison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tool ». In . Varsovie.
- . 2004b. « Inter-comparaison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools ». In *Sustainable Building Conference*. Varsovie.
- Peuportier, B., Recht, T., Munaretto, F., Vorger, E., Schalbart, P., Wurtz, E., Wurtz, F., et al. 2016. *Énergétique des bâtiments et simulation thermique*. Blanche BTP. Eyrolles. <http://www.eyrolles.com/BTP/Livre/energetique-des-batiments-et-simulation-thermique-9782212142754>.
- Polster, B. 1995. « Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie ». Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris.
- 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.
- Prasad, K. et Singru, P.M. 2010. « Performance of lognormal probability distribution in crossover operator of NSGA-II algorithm ». In *Simulated Evolution and Learning*, 514–522. Springer.
- Prendeville, S., Niemczyk, M., Sanders, C., Lafond, E., Elgorriaga, A., Mayer, S., et Kane, D. 2014. « Envisioning Ecodesign - Definitions, Case Studies and Best Practice ». European Network of Ecodesign Centres (ENEC). <http://www.eco-conception.fr/data/sources/users/4/screenenebrochure140314.pdf>.
- Pujol, G. 2009. « Simplex-based screening designs for estimating metamodels ». *Reliability Engineering & System Safety* 94 (7): 1156-60. doi:10.1016/j.res.2008.08.002.
- Pujol, G., looss, B., et Janon, A. 2016. « The R package "sensitivity", version 1.12.2 ». CRAN. <https://cran.r-project.org/web/packages/sensitivity/sensitivity.pdf>.
- Raghuwanshi, M.M., Singru, P.M., Kale, U., et Kakde, O.G. 2004. « Simulated binary crossover with lognormal distribution ». In *Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on Complex Systems (Complex 2004)*, 6–10. http://www.academia.edu/download/39775910/Simulated_Binary_Crossover_with_Lognorma20151107-4851-1x1xma.pdf.
- Rao, C.R. 1947. « Factorial experiments derivable from combinatorial arrangements of arrays ». *Supplement to the Journal of the Royal Statistical Society* 9 (1): 128–139.
- Rapone, G. et Saro, O. 2012. « Optimisation of curtain wall facades for office buildings by means of PSO algorithm ». *Energy and Buildings* 45: 189–196.
- R-core. 2015. « Package "parallel" ». CRAN. <https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/parallel/doc/parallel.pdf>.

Références bibliographiques

- R.e. Mercer et J.r. Sampson. 1978. « Adaptive search using a reproductive meta-plan ». *Kybernetes* 7 (3): 215-28.
- Reap, J., Roman, F., Duncan, S., et Bras, B. 2008a. « A survey of unresolved problems in life cycle assessment -Part 1: Goal and scope and inventory analysis ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13 (4): 290–300.
- . 2008b. « A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 2: impact assessment and interpretation ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13 (5): 374–388.
- Recht, T. 2013. « Analyse de la fiabilité de Pléiades+COMFIE par comparaison à des mesures ». Master Thesis. Ecole des Mines de Douai.
- 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 *Proceedings IBPSA France*, 8. Arras.
- Recht, T., Robillart, M., Garnier, C., Schalbart, P., et Peuportier, B. 2016. « Éco-conception de maisons à énergie positive assistée par optimisation multicritère ». In *IBPSA France*, 8. Champs-sur-Marne, 23-24 Mai 2016.
- Recht, T., Schalbart, P., et Peuportier, B. 2016. « Ecodesign of a “plus-Energy” House Using Stochastic Occupancy Model, Life-Cycle Assessment and Multi-Objective Optimisation ». In *Building Simulation & Optimisation*, 8. Great North Museum, Newcastle.
- Reeves, C.R. 1993. « Using Genetic Algorithms with Small Populations. » In *ICGA*, 590:92.
- Regnier, J. 2003. « Conception de systèmes hétérogènes en Génie Électrique par optimisation évolutionnaire multicritère ». PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Ricaud, A. et Lokhat, I. 2012. « La maison ZEN ». La revue 3EI.
<http://www.cythelia.fr/images/revue%203EI%20-%20Maison%20ZEN.pdf>.
- Rivallain, M. 2013. « Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants ». Thèse de doctorat, Université Paris Est.
<http://www.theses.fr/2013PEST1038>.
- Robillart, M. 2015. « Etude de stratégies de gestion en temps réel pour des bâtiments énergétiquement performants ». Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris.
- Rocquigny, E. de, Devictor, N., et Tarantola, S. 2008. *Uncertainty in Industrial Practice: A Guide to Quantitative Uncertainty Management*. Wiley.
<http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470994479.html>.
- Roux, C. 2016. « Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis ». Thèse de doctorat, MINES ParisTech.
- 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 ». *Journal of Cleaner Production* 113: 532-40.
doi:10.1016/j.jclepro.2015.11.052.
- Russell, S., Norvig, P., et Intelligence, A. 1995. « Artificial intelligence - A modern approach ». *Artificial Intelligence. Prentice-Hall, Englewood Cliffs* 25: 27.

- Sadeghi, J., Sadeghi, S., et Niaki, S.T.A. 2014. « A Hybrid Vendor Managed Inventory and Redundancy Allocation Optimization Problem in Supply Chain Management: An NSGA-II with Tuned Parameters ». *Computers & Operations Research* 41 (janvier): 53-64.
- Salom, J., Marszal, A.J., Widén, J., Candanedo, J., et Lindberg, K.B. 2014. « Analysis of load match and grid interaction indicators in net zero energy buildings with simulated and monitored data ». *Applied Energy* 136: 119–131.
- 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 IPBSA World*, 6:2514–2521. Sydney, Australia. <http://www.task40.iea-shc.org/data/sites/1/publications/DA-TP9-Salom-2011-11.pdf>.
- Saltelli, A. et Annoni, P. 2010. « How to avoid a perfunctory sensitivity analysis ». *Environmental Modelling & Software* 25 (12): 1508–1517.
- Saltelli, A., Chan, K., Scott, E.M., et others. 2000. *Sensitivity analysis*. Vol. 134. Wiley New York.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., et Tarantola, S. 2008. *Global sensitivity analysis: the primer*. Wiley.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., et Ratto, M. 2004. *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models*. John Wiley & Sons.
- Saltelli, A., Tarantola, S., et Chan, K.-S. 1999. « A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output ». *Technometrics* 41 (1): 39–56.
- Sartori, I., Candanedo, J., Geier, S., Lollini, R., Athienitis, A., Garde, F., et Pagliano, L. 2010. « Comfort and energy performance recommendations for net zero energy buildings ». In *Proceedings of EuroSun*. Graz, Austria. https://www.researchgate.net/profile/Lorenzo_Pagliano/publication/239607719_COMFORT_AND_ENERGY_PERFORMANCE_RECOMMENDATIONS_FOR_NET_ZERO_ENERGY_BUILDINGS/links/02e7e5347218ba9acd000000.pdf.
- Sartori, I. et Hestnes, A.G. 2007. « Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article ». *Energy and buildings* 39 (3): 249–257.
- Sartori, I., Napolitano, A., Marszal, A.J., Pless, S., Torcellini, P., et Voss, K. 2010. « Criteria for definition of net zero energy buildings ». In *International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings (EuroSun 2010)*. Graz, Austria. http://vbn.aau.dk/ws/files/43736193/Criteria_for_Definition_of_Net_Zero_Energy_Buildings.pdf.
- Sartori, I., Napolitano, A., et Voss, K. 2012. « Net zero energy buildings: A consistent definition framework ». *Energy and Buildings* 48: 220–232.
- Schaffer, J.D. 1985. « Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms ». In *Proceedings of the 1st international Conference on Genetic Algorithms*, 93–100. L. Erlbaum Associates Inc. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=657079>.
- Schott, J.R. 1995. « Fault Tolerant Design Using Single and Multicriteria Genetic Algorithm Optimization. » DTIC Document.

Références bibliographiques

- Schwefel, H.-P. 1981. *Numerical optimization of computer models*. John Wiley & Sons, Inc. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=539468>.
- Scognamiglio, A. et Røstvik, H.N. 2013. « Photovoltaics and zero energy buildings: a new opportunity and challenge for design ». *Progress in Photovoltaics: Research and applications* 21 (6): 1319–1336.
- Siarry, P. 2014. *Métaheuristiques*. Algorithmes. Eyrolles.
- Simpson, T.W., Poplinski, J.D., Koch, P.N., et Allen, J.K. 2001. « Metamodels for computer-based engineering design: survey and recommendations ». *Engineering with computers* 17 (2): 129–150.
- Sobol, I.M. 1967. « On the distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals ». *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics* 7 (4): 86–112. doi:10.1016/0041-5553(67)90144-9.
- Sobol, I.M. 1993. « Sensitivity indices for nonlinear mathematical models ». *Mathematical Modelling and Computational Experiment*, n° 1: 407–14.
- Solomon, S. 2007. *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC*. Vol. 4. Cambridge University Press.
- Souquet, A. et Radet, F.-G. 2004. « Algorithmes génétiques ». Travaux de fin d'année. Université Nice Sophia Antipolis. <http://deptinfo.unice.fr/twiki/pub/Linfo/PlanningDesSoutenances20032004/Radet-Souquet.pdf>.
- Spitz, C. 2012. « Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments ». Thèse de doctorat, Université de Grenoble. <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00768506/>.
- Spitz, C., Mora, L., Wurtz, E., et Jay, A. 2012. « Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house ». *Energy and Buildings* 55: 459–470.
- Srinivas, N. et Deb, K. 1994. « Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms ». *Evolutionary Computation* 2 (3): 221–248.
- Steffen, W., Crutzen, P.J., et McNeill, J.R. 2007. « The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature ». *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 36 (8): 614–621.
- Stein, M. 1987. « Large sample properties of simulations using Latin hypercube sampling ». *Technometrics* 29 (2): 143–151.
- Stern, N.H. 2006. *Stern Review: The economics of climate change*. Cambridge University Press.
- Stevanović, S. 2013. « Optimization of passive solar design strategies: A review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25: 177–196.
- Støa, E. et Nesje, A. 2005. « Supporting participation in the development process of sustainable neighborhoods ». In *IV International Conference « Climate change–energy awareness–energy efficiency »*, Visegrad. <https://borg.hi.is/enhr2005iceland/ppr/Stoa-Nesje.pdf>.

Références bibliographiques

- Storlie, C.B. et Helton, J.C. 2008. « Multiple predictor smoothing methods for sensitivity analysis: Description of techniques ». *Reliability Engineering & System Safety* 93 (1): 28–54.
- Storn, R. et Price, K. 1997. « Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces ». *Journal of global optimization* 11 (4): 341–359.
- Strachan, P.A., Kokogiannakis, G., et Macdonald, I.A. 2008. « History and development of validation with the ESP-r simulation program ». *Building and Environment* 43 (4): 601–609.
- Taguchi, G. et Yokoyama, T. 1993. « Taguchi Methods: Design of Experiments ». *ASI Press*.
- Talbi, E.-G. 2002. « A taxonomy of hybrid metaheuristics ». *Journal of heuristics* 8 (5): 541–564.
- Talbourdet, F. 2014. « Développement d'une démarche d'aide à la connaissance pour la conception de bâtis performants ». Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- Tang, B. 1993. « Orthogonal array-based Latin hypercubes ». *Journal of the American statistical association* 88 (424): 1392–1397.
- Tarantola, S., Gatelli, D., et Mara, T.A. 2006. « Random balance designs for the estimation of first order global sensitivity indices ». *Reliability Engineering & System Safety* 91 (6): 717–727.
- Thiers, S. 2008. « Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive ». École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
<http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00004692>.
- Thiers, S. et Peuportier, B. 2012. « Energy and environmental assessment of two high energy performance residential buildings ». *Building and Environment* 51: 276–284.
- Tian, W. 2013. « A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20: 411–419.
- Tissot, J.-Y. et Prieur, C. 2012. « Bias correction for the estimation of sensitivity indices based on random balance designs ». *Reliability Engineering & System Safety* 107: 205–213.
- Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., et Crawley, D. 2006. « Zero energy buildings: a critical look at the definition ». *National Renewable Energy Laboratory and Department of Energy, US*.
http://www.biomassthermal.org/programs/documents/118_ZEBCriticalLookDefinition.pdf.
- Torcellini, P.A. et Ellis, P.G. 2006. « 'Early-phase design methods' ». *Center for Buildings and Thermal Systems at National Renewable Energy Laboratory (NREL)*.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2015. « World Population Prospects: The 2015 Revision, Volume II: Demographic Profiles ». Department of Economic and Social Affairs, Population Division. <http://esa.un.org/unpd/wpp/>.
- Van Veldhuizen, D.A. 1999. « Multiobjective evolutionary algorithms: classifications, analyses, and new innovations ». DTIC Document.

Références bibliographiques

- <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA364478>.
- Verbeeck, G. 2007. « Optimisation of extremely low energy residential buildings ». Thèse de doctorat, Katholieke Universiteit Leuven.
<https://lirias.kuleuven.be/handle/1979/852>.
- Verbeeck, G. et Hens, H. 2007. « Life Cycle Optimization of Extremely Low Energy Dwellings ». *Journal of Building Physics* 31 (2): 143-77.
doi:10.1177/1744259107079880.
- Verbruggen, B., Coninck, R.D., Baetens, R., Saelens, D., Helsen, L., et Driesen, J. 2011. « Grid impact indicators for active building simulation ». In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES*, 1-6. IEEE.
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5759161.
- Vorger, E. 2014. « Etude de l'influence du comportement des occupants sur la performance énergétique des bâtiments ». Thèse de doctorat, École nationale supérieure des Mines de Paris.
- Vorger, E., Schalbart, P., et Peuportier, B. 2014. « Etude de l'influence des occupants sur la performance énergétique des logements par le biais d'une modélisation stochastique globale ». In *IBPSA France*. Arras.
- Voss, K., Goetzberger, A., Bopp, G., Häberle, A., Heinzl, A., et Lehmborg, H. 1996. « The self-sufficient solar house in Freiburg—Results of 3 years of operation ». *Solar Energy* 58 (1): 17-23.
- Voss, K., Musall, E., et Lichtmess, M. 2011. « From low-energy to Net Zero-Energy Buildings: status and perspectives ». *Journal of Green Building* 6 (1): 46-57.
- Voss, K., Sartori, I., Napolitano, A., Geier, S., Gonçalves, H., Hall, M., Heiselberg, P., et al. 2010. « Load matching and grid interaction of net zero energy buildings ». <http://repositorio.ineg.pt/handle/10400.9/963>.
- Wang, W., Rivard, H., et Zmeureanu, R. 2005. « An object-oriented framework for simulation-based green building design optimization with genetic algorithms ». *Advanced Engineering Informatics* 19 (1): 5-23.
- . 2006. « Floor shape optimization for green building design ». *Advanced Engineering Informatics* 20 (4): 363-378.
- Wang, W., Zmeureanu, R., et Rivard, H. 2005. « Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization ». *Building and Environment* 40 (11): 1512-1525.
- Wiener, N. 1938. « The homogeneous chaos ». *American Journal of Mathematics*, 897-936.
- Wodli, J. 2012. « Analyses d'incertitudes et de sensibilité du logiciel Pléiades+Comfie ».
- Wolpert, D.H. et Macready, W.G. 1997. « No free lunch theorems for optimization ». *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 1 (1): 67-82.
- World Commission on Environment and Development. 1987. « Our common future ». Oxford: Oxford University Press.
- Wright, J. et Alajmi, A. 2005. « The robustness of genetic algorithms in solving unconstrained building optimization problems ». In *Proceedings of the 7th IBPSA Conference: Building Simulation, Montréal, Canada August*, 15-18.
http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2005/BS05_1361_1368.pdf.

- Wright, J. et Loosemore, H. 2001. « An infeasibility objective for use in constrained pareto optimization ». In *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, 256–268. Springer.
http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-44719-9_18.
- Wright, J.A., Loosemore, H.A., et Farmani, R. 2002. « Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm ». *Energy and Buildings* 34 (9): 959–972.
- Xiao, D. 2006. « Inter-model, analytical, and experimental validation of a heat balance based residential cooling load calculation procedure ». <https://shareok.org/handle/11244/7823>.
- 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 ». *Energy and Buildings* 127: 714–729.
- Yepez-Salmon, G. 2011. « Construction d'un outil d'évaluation environnemental des écoquartiers : vers une méthode systémique de mise en œuvre de la ville durable ». Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1.
- Yuan, Y., Yuan, J., Du, H., et Li, L. 2012. « An improved multi-objective ant colony algorithm for building life cycle energy consumption optimisation ». *International Journal of Computer Applications in Technology* 43 (1): 60–66.
- Zirngibl, J. 2014. « Nearly Zero Energy Buildings (nZEB) in the CEN Draft Standard ». *REHVA Journal - Volume: 51 - Issue: 3*, mai.
- Zitzler, E. 1999. « Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications ». Thèse de doctorat, Swiss Federal Institute of Technology of Zurich (ETH).
- Zitzler, E., Deb, K., et Thiele, L. 2000. « Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results ». *Evolutionary computation* 8 (2): 173–195.
- Zitzler, E. et Thiele, L. 1998. « Multiobjective optimization using evolutionary algorithms—a comparative case study ». In *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, 292–301. Springer.
<http://link.springer.com/chapter/10.1007/BFb0056872>.
- Znouda, E., Ghrab-Morcos, N., et Hadj-Alouane, A. 2007. « Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms ». *Energy and Buildings* 39 (2): 148–153.

Annexes

Annexe A - Initiatives nationales ou internationales sur le BEPOS

Cette annexe correspond à une revue de littérature grise sur les initiatives enclenchées autour du concept, au sens large, de ZEB (*Zero Energy Building*), incluant le BEPOS français.

Le **programme de recherche allemand EnOB**⁸⁶ (*« Energy Optimised Building »*) est financé par le ministère fédéral allemand de l'économie et des technologies. Basé sur l'ambition de développer les bâtiments du futur, ce programme se décline en cinq thématiques :

1. « *EnBau* » : sur la construction de bâtiments neufs, et particulièrement sur les ZEB ;
2. « *EnSan* » : sur la rénovation des bâtiments existants ;
3. « *EnBop* » : sur la gestion énergétique des bâtiments ;
4. « *LowEx* » : sur les systèmes et équipements innovants dans les bâtiments ;
5. « *ViBau* » : sur le marché de l'isolation sous vide.

L'**organisation anglaise à but non lucratif « Zero Carbon Hub »**⁸⁷, a pour but de permettre l'application opérationnelle de la réglementation nationale visant un standard « *zero carbon* » à partir de 2016. Ces activités comportent des travaux pour développer une définition technique du concept, mener des projets de recherche, diffuser des informations (p. ex. sous forme de manuels ou de publications) notamment auprès des industriels, organiser des événements de rencontres et d'échanges, et créer des bâtiments exemplaires pour montrer les solutions techniques possibles.

Le **centre stratégique danois sur les ZEB**⁸⁸ s'intéresse principalement au développement de technologies innovantes et au confort en lien avec l'industrie. Il a également produit trois livres techniques à destination des

⁸⁶ <http://www.enob.info/en/>

⁸⁷ <http://www.zerocarbonhub.org/>

⁸⁸ <http://www.en.zeb.aau.dk/>

opérationnels et a notamment participé à un état de l'art des définitions et méthodes de calcul sur les ZEB (Marszal et al. 2011).

Le **centre de recherche national norvégien sur les bâtiments zéro émission**⁸⁹, a pour objectif de développer des solutions et des produits compétitifs pour faciliter la pénétration des bâtiments à zéro émission de GES sur le marché (en neuf comme en rénovation). Ses activités sont divisées en cinq lots de travail :

1. « *Matériaux et systèmes avancés* » : sur le développement de produits innovants, notamment les nano-isolants et les matériaux électrochromes pour l'utilisation de fenêtres « intelligentes ».
2. « *Technologies d'enveloppe à basse énergie* » : sur le développement de solutions d'éléments de façade adaptées pour minimiser les déperditions, les besoins de rafraîchissement, et les émissions de CO₂. En particulier, le centre travaille sur les façades transparentes, les fenêtres, et les protections solaires mais aussi sur des éléments actifs comme le photovoltaïque par exemple.
3. « *Systèmes de fourniture énergétique et services* » : sur le pilotage au sens global (énergétique, économique, qualité de l'air intérieur, etc.) du bâtiment.
4. « *Exploitation réelle du bâtiment* » : sur l'usage du bâtiment dans les conditions réelles (p. ex. comportement non anticipé des occupants) et l'étude des aspects sociétal, culturel, et politique de ce type de bâtiments.
5. « *Concepts et stratégies sur le bâtiment zéro émission* » : sur le déploiement opérationnel de ces bâtiments, grâce aux travaux des lots précédents, via la mise en place notamment de normes, réglementations mais aussi de guides et de modes d'emploi.

Nous proposons de présenter plus en détails deux initiatives :

1. l'annexe 52 « *Towards Net Zero Energy Solar Buildings* » de l'AIE, dont l'activité sur la définition du NZEB a été présentée dans le § 1.1.3.1 ;
2. le projet français COMEPOS, auquel ces travaux de thèse sont associés.

A-1 - TRAVAUX DE L'AIE : « TOWARDS NET ZERO ENERGY SOLAR BUILDINGS »

Entre 2008 et la fin 2013, des chercheurs de dix-neuf pays ont collaboré au sein du projet de recherche conjoint de l'AIE sur les NZEB, à savoir l'annexe 52

⁸⁹ <http://www.zeb.no/>

« *Towards Net Zero Energy Solar Buildings* » du programme ECBCS « *Energy Conservation in Buildings and Community Systems* » et la tâche 40 jointe du programme SHC « *Solar Heating and Cooling* ». La finalité de ce projet conjoint est de clarifier le concept de NZEB à l'échelle internationale et de le rendre commercialisable. La tâche a étudié tous types de bâtiments : neuf ou existant, résidentiel ou non, et dans les zones climatiques des pays participants (Autriche, Canada, Espagne, Finlande, France d'outre mer, Nouvelle-Zélande, Singapour...). Le projet a été réparti selon quatre lots de travail :

1. lot A : Définitions et implications à grande échelle ;
2. lot B : Outils pour le processus de conception ;
3. lot C : Conception avancée, solutions technologiques et lignes d'orientation pour les professionnels ;
4. lot D : Communication et dissémination (non détaillé dans la suite).

Une synthèse des principales avancées sur chacun de ces lots est proposée ci-dessous.

❖ Synthèse des avancées - Lot A

La contribution majeure du lot A est probablement sa proposition de méthodologie commune pour une compréhension internationalement reconnue du concept de NZEB (présentée dans le § 1.1.3.1). L'article de Sartori et al. (2012) propose un cadre cohérent de définitions à partir de travaux précédents, notamment Marszal et al. (2011), Salom et al. (2011), Sartori, Napolitano, et al. (2010), et Voss et al. (2010). Un rapport technique sur le protocole de mesures et de vérification pour les NZEB (Napolitano et Lollini 2011) et une analyse comparative d'indicateurs de type « *load match* » et « *grid interaction* » simulés et mesurés (Salom et al. 2014) complètent cette réflexion globale de l'AIE sur la définition des NZEB.

Un outil sous Excel (Figure A-1) a également été développé permettant, après avoir saisi l'ensemble des résultats simulés ou mesurés (i.e. les énergies importée et exportée p. ex.) et les facteurs de pondération adéquats, d'évaluer un projet de bâtiment ou un bâtiment existant par rapport à quatre définitions prédéfinies (« *Net ZEB Limited* », « *Net ZEB primary* », « *Net ZEB strategic* », « *Net ZEB Carbon* »), comparées à la Figure A-2.

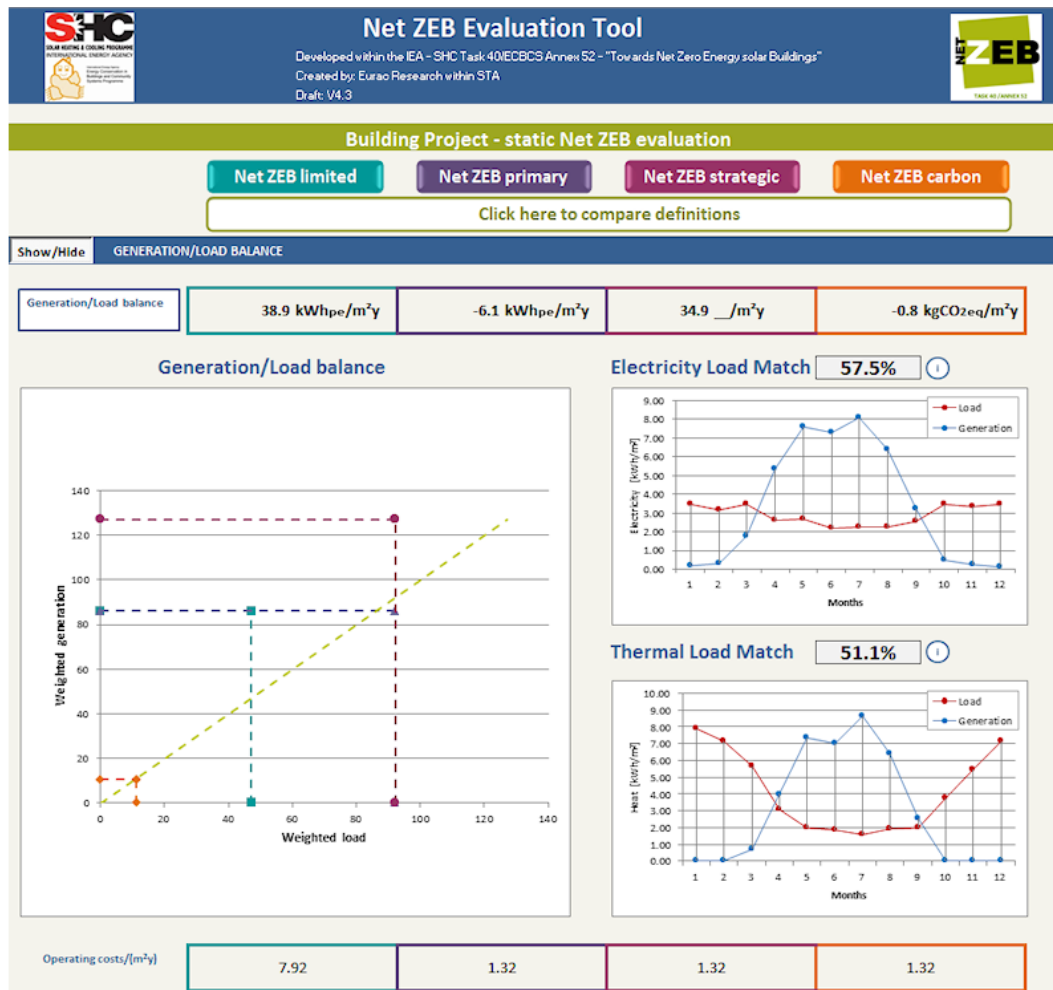


Figure A-1. Exemple de sorties de l'outil d'évaluation développé par l'AIE
(<http://task40.iea-shc.org/net-zeb>)

		Net ZEB limited	Net ZEB primary	Net ZEB strategic	Net ZEB carbon
Building system boundary	Balance boundary	HEATING DHW COOLING VENTILATION AUXILIARIES BUILT-IN LIGHTING (only non residential buildings)	HEATING DHW COOLING VENTILATION AUXILIARIES BUILT-IN LIGHTING PLUG LOADS	HEATING DHW COOLING VENTILATION AUXILIARIES BUILT-IN LIGHTING PLUG LOADS	HEATING DHW COOLING VENTILATION AUXILIARIES BUILT-IN LIGHTING PLUG LOADS
Weighting system	Metric	PRIMARY ENERGY	PRIMARY ENERGY	Whichever metric desired	CARBON EMISSION
	Symmetry	SYMMETRIC	SYMMETRIC	SYMMETRIC or ASYMMETRIC	SYMMETRIC or ASYMMETRIC
	Time dependent accounting	STATIC OR QUASI-STATIC	STATIC OR QUASI-STATIC	STATIC OR QUASI-STATIC	STATIC OR QUASI-STATIC
Net ZEB balance	Energy efficiency	NATIONAL/LOCAL ENERGY EFFICIENCY REQUIREMENTS ARE FULFILLED	NATIONAL/LOCAL ENERGY EFFICIENCY REQUIREMENTS ARE FULFILLED	ANY NATIONAL/LOCAL ENERGY EFFICIENCY REQUIREMENTS HAS TO BE FULFILLED	ANY NATIONAL/LOCAL ENERGY EFFICIENCY REQUIREMENTS HAS TO BE FULFILLED
	Energy supply	ON SITE GENERATION DRIVEN BY ON/OFF SITE SOURCES	ON SITE GENERATION DRIVEN BY ON/OFF SITE SOURCES	ON/OFF SITE GENERATION DRIVEN BY ON/OFF SITE SOURCES	ON SITE GENERATION DRIVEN BY ON/OFF SITE SOURCES

Figure A-2. Caractéristiques des quatre définitions proposées par l'outil (capture d'écran à partir du logiciel disponible sur le site de l'AIE : <http://task40.iea-shc.org/net-zeb>)

❖ Synthèse des avancées - Lot B

L'objectif de ce lot est d'identifier et améliorer les approches et outils de conception pour faciliter leur adoption par les professionnels du secteur. L'une des principales avancées de ce lot correspond à une réflexion menée sur les obstacles et les besoins à l'intégration d'outils d'optimisation de la performance des bâtiments dans le processus de conception de NZEB (Attia et al. 2013b), basée sur un benchmark à la fois quantitatif (revue de 165 publications) et qualitatifs (interviews de 28 experts) décrit par Attia et al. (2013a). L'autre contribution majeure correspond à la parution d'un livre intitulé « *Modeling, Design, and Optimisation of Net-Zero Energy Buildings* » (Athienitis et al. 2015) décrivant les bases de la modélisation adaptée aux NZEB, les outils de modélisation, l'utilisation de l'optimisation pour assister le processus de conception, les aspects d'interaction avec le réseau, et quatre études de cas avec des comparaisons entre simulations et mesures.

❖ Synthèse des avancées - Lot C

Ce lot a pour but de développer et tester différentes solutions innovantes et globales de NZEB pour différents climats, avec des architectures et des technologies exemplaires qui pourront être adoptées comme préceptes de base par l'industrie. L'une des contributions principales est la réalisation d'une cartographie recensant pratiquement 300 NZEB à travers le monde entier (§ 1.1.4.1). Parmi cette liste, 30 projets ont été sélectionnés pour être analysés de manière détaillée, et caractérisés via des fiches structurées. Ce travail correspond à un rapport technique (Garde et Donn 2014), présentant des informations

techniques et non techniques sur chaque projet, en les classant selon deux critères :

- le type de bâtiment :
 - o non-résidentiel ;
 - o résidentiel ;
- et le type de climat :
 - o où le chauffage domine ;
 - o où le rafraîchissement domine ;
 - o où le chauffage et le rafraîchissement sont significatifs.

Des travaux spécifiques sur les NZEB en climat chaud et humide (Garde et al. 2011; Lenoir, et al. 2011) et sur le photovoltaïque (Scognamiglio et Røstvik 2013) ont également été menés.

A-2 - LE PROJET COMEPOS

En France, le projet de recherche et de démonstration COMEPOS⁹⁰ vise à définir et valider la notion de bâtiment à énergie positive, traduction nationale du nZEB européen. Il consiste à développer le concept de maison individuelle à énergie positive tous usages (usages réglementaires et usages dits « mobiliers » non réglementaires) avec une réelle maîtrise des surcoûts, dans le cadre de l'évolution de la réglementation thermique à l'horizon 2020.

❖ Objectifs

Les objectifs du projet COMEPOS sont de :

- réaliser les études, la simulation, la conception technologique, le monitoring et le retour d'expérience de bâtiments démonstrateurs, ainsi que le développement de systèmes technologiques innovants qui y seront intégrés ;
- montrer la faisabilité du concept via la réalisation de 25 bâtiments démonstrateurs habités qui seront répartis sur l'ensemble du territoire français, en partenariat avec une dizaine de constructeurs adhérents à l'Union des Maisons Françaises, récemment devenue « Les constructeurs et aménageurs de la FFB⁹¹ » (LCA-FFB).

⁹⁰ www.comepos.fr

⁹¹ <http://www.lca-ffb17.fr/>

L'échantillon élevé et dispersé sur l'ensemble du territoire de ces démonstrateurs, intégrant les différentes innovations proposées par les industriels, permettra de définir les solutions réellement efficaces en fonction des types de climat, des modes de construction mais également des modes de vie.

❖ Description des lots de travail

Le travail du projet est reparti 6 lots (Figure A-3)

1. Définition de l'état de l'art et analyse des performances des bâtiments résidentiels à énergie positive déjà existants, afin de pouvoir aboutir à l'identification des verrous principaux à lever et à la définition conceptuelle de maison à énergie positive à réaliser, aussi bien qu'à la définition des grandeurs principales à mesurer et des modalités de mesure.
2. Évaluation et choix des composants technologiques innovants d'enveloppe et des systèmes climatiques à installer dans les démonstrateurs et de leur modalité d'intégration, coordination des partenaires industriels impliqués dans le projet.
3. Conception des maisons à énergie positive à construire, par le biais de la Simulation Thermique Dynamique (STD) ; en vue d'une approche globale, la conception des maisons prendra aussi en compte l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Développement d'outils pour la conception optimisée des maisons à énergie positive. **Les connaissances produites dans le cadre de ces travaux de thèse sont mises à profit dans ce lot.**
4. Construction des 25 maisons à énergie positive, distribuées sur le territoire français : deux vagues de démonstrateurs seront réalisées, la première de 10 maisons, la deuxième de 15 maisons ; définition d'un modèle économique, commercial et juridique ; élaboration d'une garantie de performance qui puisse faciliter et régler la diffusion de ce type de maison.
5. Suivi des performances de ces maisons, réflexion sur l'optimisation du pilotage, retour d'expérience et pistes d'amélioration ; développement d'outils pour le suivi des maisons à énergie positive.
6. Management du projet et valorisation des résultats : ce lot permet de gérer le projet, d'assurer une circulation efficace des informations parmi les partenaires et de faciliter la valorisation des résultats et la communication aux acteurs du marché.

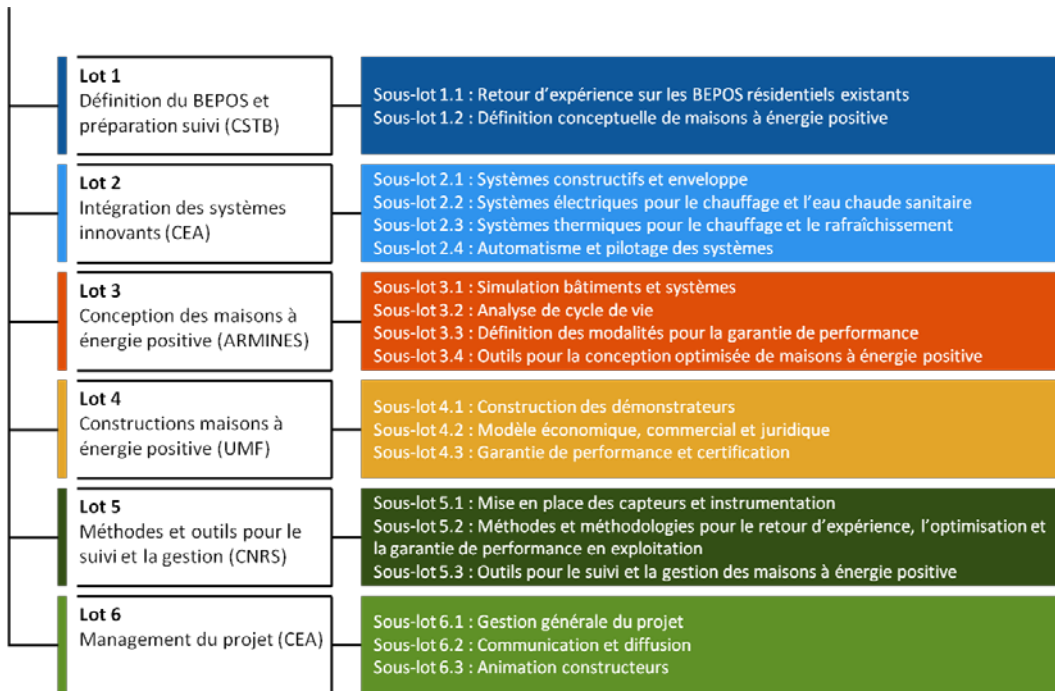


Figure A-3. Organisation du projet COMEPOS par lots et sous-lots de travail

❖ Résultats attendus

Le projet COMEPOS permettra la validation *in situ* de solutions technologiques intégrées pour les systèmes constructifs et pour les systèmes photovoltaïques, ainsi que de solutions innovantes d'étanchéité à l'air. Il permettra aussi l'optimisation d'enveloppes multifonctionnelles et de produits d'isolation. Le principal résultat attendu est la validation en conditions réelles de la faisabilité des maisons à énergie positive sur un large panel, représentatif des différents climats et des divers modes de construction. Le retour d'expérience du projet sera un atout précieux pour contribuer à l'évolution de la réglementation thermique à l'horizon 2020 ; et pour aider la chaîne des acteurs, et en particulier l'ensemble des constructeurs, à mieux anticiper l'entrée en vigueur de cette réglementation. Le projet permettra notamment d'explorer le marché en déployant une nouvelle offre de maisons individuelles à énergie positive.

Plus globalement, le projet contribuera à la réduction de la consommation d'énergie dans le secteur du logement individuel, et permettra par la réalisation d'une analyse de cycle de vie d'étudier à quel point les concepts développés sont également performants sur les autres aspects environnementaux. Ces travaux donneront lieu à un modèle économique générique visant la maîtrise des surcoûts liés à cette évolution des performances.

Par ailleurs, dans le cadre du projet, il sera mis au point un système de pilotage des équipements de la maison et d'affichage des consommations adaptés à ce type d'opérations. Deux niveaux de systèmes seront étudiés : un

niveau standard, où sera recherché le meilleur compromis coût / fonctionnalités, et un niveau plus élaboré permettant d'optimiser davantage les consommations.

❖ **Application et valorisation**

Le projet contribuera à l'accélération de la mise sur le marché de maisons à énergie positive, de systèmes et composants innovants, ainsi que d'outils optimisés de conception et de pilotage énergétique. A la suite des premiers démonstrateurs réalisés au cours du projet, le développement à grande échelle de ce type de maisons est attendu, tout d'abord par les différents constructeurs partenaires du projet, puis à plus long terme par l'ensemble des adhérents de l'union LCA-FFB.

Annexe B - Bilan énergétique de la maison INCAS Béton Banché

Dans le but d'estimer ce que pourrait être un bilan vraisemblable de la maison INCAS Béton Banché, un scénario d'occupation a été défini (4 personnes, chauffage à 19 °C, apports internes correspondant à 2680 kWh sur l'année). Un bilan électrique en énergie finale au pas de temps horaire a ainsi pu être établi.

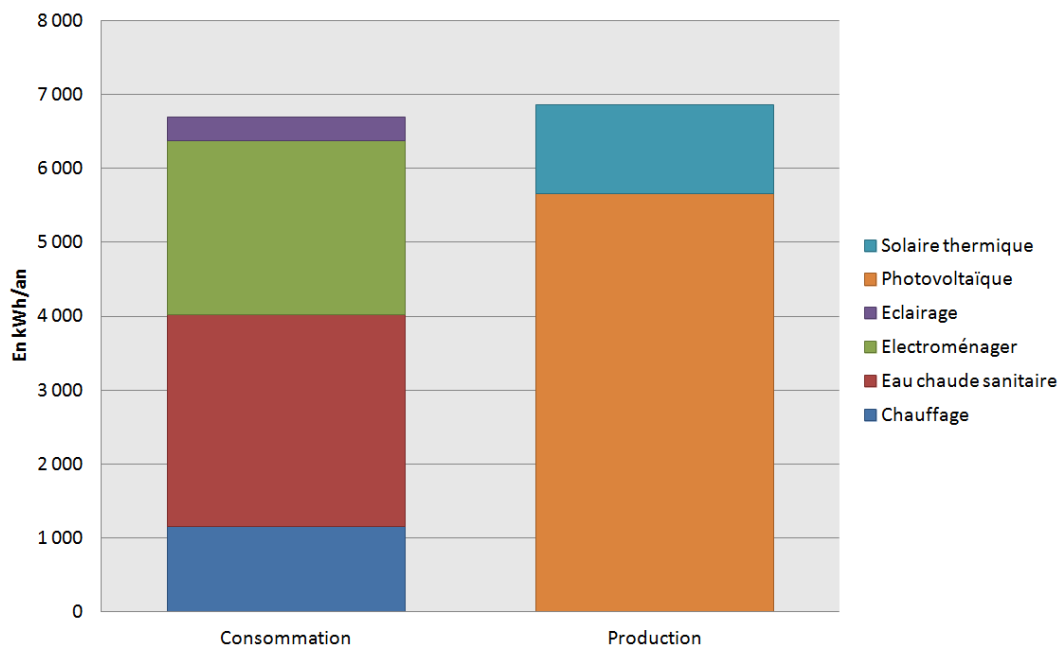


Figure B-4. Bilan électrique annuel de la maison INCAS Béton Banché

Au niveau des consommations annuelles (Figure B-4), il est observable que le chauffage (environ 1150 kWh) n'est plus le poste principal dans les consommations, contrairement aux maisons peu performantes. Selon le scénario d'usage considéré, les postes les plus consommateurs sont l'eau chaude sanitaire (près de 2880 kWh) et l'électroménager (avec environ 2360 kWh). L'éclairage représente seulement 6 % des consommations. Au niveau des productions, le solaire photovoltaïque atteint 5650 kWh soit plus de 80 % de la consommation totale (en énergie finale). Cette production importante est cohérente avec la surface importante de panneaux (43 m²). Le solaire thermique couvre un peu plus de 40 % de la consommation en ECS. Globalement, le bilan est équilibré et cette maison pourrait être « à énergie positive » si un bilan annuel est retenu. Les résultats restent néanmoins soumis à des incertitudes.

La Figure B-5 présente les bilans électriques mensuels ce qui permet d'observer l'évolution des consommations et des productions tout au long de l'année. Les scénarios pour l'éclairage et l'électroménager étant fixes, la consommation mensuelle ne varie que de manière minime (suivant le nombre de jours) à l'exception des vacances (deux semaines en août et une en décembre). Le volume d'eau chaude puisé par personne et par jour étant constant sur l'année, les consommations pour le poste ECS ne varient que légèrement avec l'évolution de la température d'eau froide. Le chauffage présente une forte saisonnalité puisqu'il représente 45 % de la consommation totale au moins de janvier et est inactif de mai à octobre. Ainsi, un facteur deux peut être constaté entre les consommations totales en été et en hiver. Ce résultat correspond au cas d'un chauffage produit par une résistance électrique. Dans le cas d'une pompe à chaleur (PAC), l'écart de consommation entre ces périodes serait bien moins prononcé puisque réduit par la valeur du coefficient de performance (COP). La production photovoltaïque est supérieure à l'ensemble des besoins électriques de mars à octobre ce qui ne signifie pas pour autant qu'elle les couvre en permanence. En effet, à l'échelle de la journée, les pics de consommation ne sont souvent pas synchrones avec ceux de production d'où l'intérêt de calculer un suivi infra-horaire des flux énergétiques des bâtiments à énergie positive. De par l'inclinaison verticale des capteurs, la consommation électrique évitée grâce au solaire thermique est moins variable à l'échelle annuelle que la production électrique du photovoltaïque.

Les principales perspectives de cette étude sont d'intégrer plus précisément l'influence des comportements au niveau de l'eau chaude sanitaire et de l'électroménager via, par exemple, l'utilisation de modèles stochastiques (Vorger et al. 2014).

Annexes

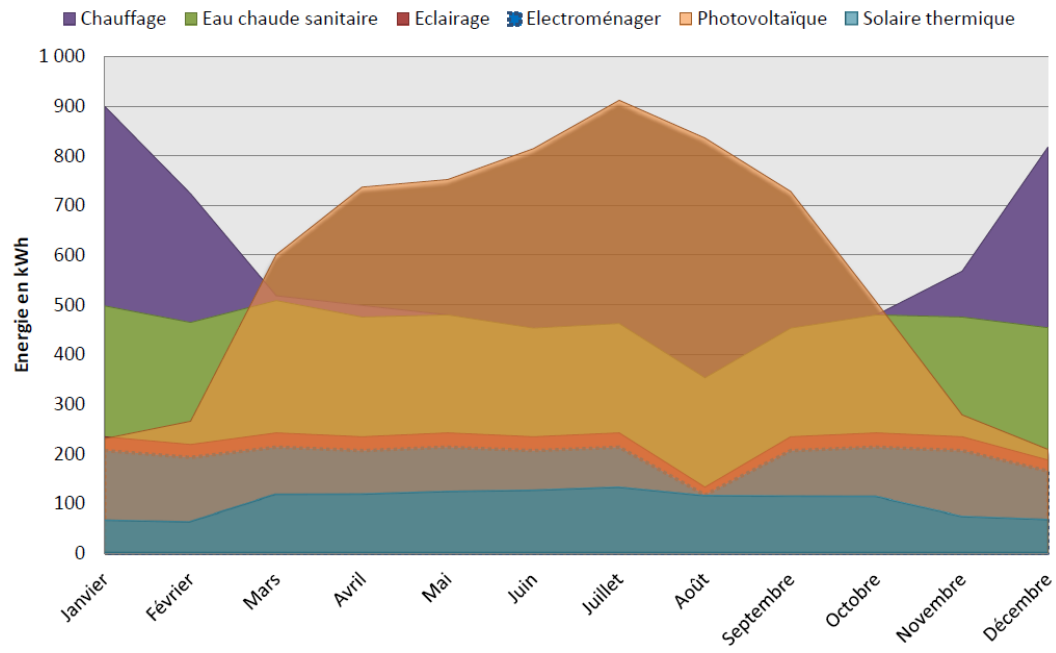


Figure B-5. Bilans électriques mensuels

Annexe C – Criblage de Morris

C-1 - LISTE DES FACTEURS ÉTUDIÉS PAR CRIBLAGE DE MORRIS

Le Tableau C-1 recense l'ensemble des informations concernant les 153 facteurs analysés par criblage de Morris.

Certains paramètres ont été volontairement écartés de l'étude car ils étaient parfaitement connus dans notre cas, et d'autres n'ont pas pu être pris en compte du fait d'une impossibilité ou d'une difficulté trop élevée d'implémentation informatique. C'est le cas :

- du nombre maximal de modes par zone dans le modèle réduit par analyse modale, fixé à 10 dans le code ;
- de la raison géométrique définissant les premières mailles intérieures dans une paroi, fixée à 3 ;
- du nombre de mailles dans les parois lourdes, fixé à 3.

Des tests ont été menés pour valider les choix des valeurs considérées (Bruno Peuportier et Blanc-Sommereux 1990).

Un soin particulier a été porté sur la problématique de l'interdépendance des paramètres. Soit les paramètres étaient interdépendants, soit l'incertitude était déterminée par calcul. Par exemple, celle de la capacité thermique volumique a été calculée à partir de celles de la masse volumique et de la capacité thermique massique.

Tableau C-1. Liste des 153 facteurs incertains pour le criblage de Morris, tiré de Munaretto (2014)

n°	Description	Nom	VB	Vref	VH	Unité
1	Albébo du sol	Alb	0.30	0.35	0.40	[-]
2	Latitude	Lat	45.596	45.642	45.687	[°]
3	Longitude	Lon	-5.869	-5.875	-5.881	[°]
4	Température du sol	Tsol	7	9	11	[°C]
5	Text	Text	0	0.5	1	[°C]
6	Gh	Gh	-5	0	5	[%]
7	Dh	Dh	-5	0	5	[%]
8	Orientation (par rapport à axe Sud)	Or	-17	-15	-13	[°]
9	Hauteur du bâtiment	H	627	632	637	[cm]
10	Longueur (Axe Est/Ouest)	L	821	826	831	[cm]
11	Largeur du bâtiment (Axe Nord/Sud)	l	721	726	731	[cm]
12	Consigne de température 20°	Tc20	19.5	20.0	20.5	[°C]
13	Consigne de température 24°	Tc24	23.5	24.0	24.5	[°C]
14	Taux d'infiltration	Qv-inf	0.027	0.030	0.033	[vol.h ⁻¹]
15	Débit de la VMC nominal (110)	Qv-nom1	93.5	110.0	126.5	[m ³ .h ⁻¹]
16	Débit de la VMC fort (160)	Qv-nom2	136	160	184	[m ³ .h ⁻¹]
17	Débit ventilation "naturelle" Combles	Qv-combles	2	3	4	[vol.h ⁻¹]
18	Débit ventilation "naturelle" VS	Qv-vs	0.5	1.0	1.5	[vol.h ⁻¹]
19	Puissance dissipée des appareils Salon	Pd-salon	28.50	30.00	31.50	[W]
20	Puissance dissipée des appareils Cellier	Pd-cellier	56.05	59.00	61.95	[W]
21	Puissance dissipée des appareils Hall	Pd-hall	75.05	79.00	82.95	[W]
22	Puissance dissipée des appareils Ch2	Pd-ch2	9.50	10.00	10.50	[W]
23	Puissance dissipée des appareils Sdb	Pd-sdb	28.50	30.00	31.50	[W]
24	Puissance de chauffage	Pch-nom	1140	1200	1260	[W]
25	Uw menuiserie IBB - F1	Uw-F1	1.33	1.40	1.47	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
26	Uw menuiserie IBB - F2	Uw-F2	1.25	1.31	1.38	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
27	Uw menuiserie IBB - F3	Uw-F3	1.29	1.36	1.42	[W.m ⁻² .K ⁻¹]

Annexes

28 Uw menuiserie IBB - F4	Uw-F4	1.41	1.49	1.56	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
29 Uw menuiserie IBB - F5 Combles	Uw-F5c	1.39	1.46	1.54	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
30 Uw menuiserie IBB - F5 Salon	Uw-F5s	1.37	1.44	1.52	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
31 Uw menuiserie IBB - F6	Uw-F6	1.36	1.43	1.50	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
32 Uw menuiserie IBB - F7	Uw-F7	1.23	1.29	1.36	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
33 Uw menuiserie IBB - F8	Uw-F8	1.30	1.37	1.44	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
34 Uw menuiserie IBB - Porte bois intérieure	Uw-PorteInt	4.75	5.00	5.25	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
35 Uw menuiserie IBB - Porte bois extérieure	Uw-PorteExt	1.14	1.20	1.26	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
36 Sw menuiserie IBB - F1	Sw-F1	2.92	2.95	2.98	$[m^2]$
37 Sw menuiserie IBB - F2	Sw-F2	4.81	4.85	4.90	$[m^2]$
38 Sw menuiserie IBB - F3	Sw-F3	2.08	2.10	2.12	$[m^2]$
39 Sw menuiserie IBB - F4	Sw-F4	0.60	0.60	0.61	$[m^2]$
40 Sw menuiserie IBB - F5 Combles	Sw-F5c	0.80	0.81	0.81	$[m^2]$
41 Sw menuiserie IBB - F5 Salon	Sw-F5s	0.80	0.81	0.81	$[m^2]$
42 Sw menuiserie IBB - F6	Sw-F6	0.90	0.91	0.92	$[m^2]$
43 Sw menuiserie IBB - F7	Sw-F7	0.80	0.81	0.81	$[m^2]$
44 Sw menuiserie IBB - F8	Sw-F8	0.60	0.60	0.61	$[m^2]$
45 Sw menuiserie IBB - Porte bois intérieure	Sw-PorteInt	1.68	1.69	1.71	$[m^2]$
46 Sw menuiserie IBB - Porte bois extérieure	Sw-PorteExt	2.13	2.15	2.17	$[m^2]$
47 Résistance thermique des occultations	Rocc	0.1	0.2	0.3	$[m^2.K.W^{-1}]$
48 Facteur d'occultation	Focc	90	95	100	[%]
49 Emissivité de Toiture sous PV	EpsToit	0.40	0.50	0.60	[-]
50 Emissivité de Peinture blanche	EpsPeintBl	0.86	0.91	0.96	[-]
51 Emissivité de Couleur lisse brun	EpsPeintBr	0.86	0.90	0.95	[-]
52 Emissivité de Enduit	EpsEnduit	0.86	0.90	0.95	[-]
53 Absorptivité de Toiture sous PV	AlphaToit	0.10	0.20	0.30	[-]
54 Absorptivité de Peinture Blanche	AlphaPeintBl	0.17	0.20	0.23	[-]
55 Absorptivité de Couleur lisse brun	AlphaPeintBr	0.60	0.70	0.81	[-]
56 Absorptivité de Enduit	AlphaEnduit	0.55	0.65	0.75	[-]
57 Facteur solaire vitrage IBB - F1	Sg-F1	57.00	60.00	63.00	[%]
58 Facteur solaire vitrage IBB - F2	Sg-F2	57.00	60.00	63.00	[%]

Annexes

59 Facteur solaire vitrage IBB - F3	Sg-F3	57.00	60.00	63.00	[%]
60 Facteur solaire vitrage IBB - F4	Sg-F4	57.00	60.00	63.00	[%]
61 Facteur solaire vitrage IBB - F5 Combles	Sg-F5c	57.00	60.00	63.00	[%]
62 Facteur solaire vitrage IBB - F5 Rdc	Sg-F5s	57.00	60.00	63.00	[%]
63 Facteur solaire vitrage IBB - F6	Sg-F6	57.00	60.00	63.00	[%]
64 Facteur solaire vitrage IBB - F7	Sg-F7	42.75	45.00	47.25	[%]
65 Facteur solaire vitrage IBB - F8	Sg-F8	42.75	45.00	47.25	[%]
66 Epaisseur Polystyrène extrudé Styrofoam	e-PolystPb	19.50	20.00	20.50	[cm]
67 Epaisseur Dalle plein en béton armé	e-Dalle	15.50	16.00	16.50	[cm]
68 Epaisseur Chape béton	e-Chape	7.50	8.00	8.50	[cm]
69 Epaisseur Carrelage	e-Carrelage	0.95	1.00	1.05	[cm]
70 Epaisseur Placoplatre BA 13	e-Placo	1.24	1.30	1.37	[cm]
71 Epaisseur Lamé d'air 15 cm	e-LameAir	14.50	15.00	15.50	[cm]
72 Epaisseur Plancher hourdis (16+4)	e-PIPoutrelles	19.50	20.00	20.50	[cm]
73 Epaisseur Plâtre gypse (1cm)	e-Platre	0.95	1.00	1.05	[cm]
74 Epaisseur Laine de verre	e-LDV	3.80	4.00	4.20	[cm]
75 Epaisseur Crépis	e-Crepis	1.43	1.50	1.58	[cm]
76 Epaisseur Polystyrène extrudé Wallmate	e-PolystMur	19.50	20.00	20.50	[cm]
77 Epaisseur Enduit hydrofuge	e-Enduit	1.43	1.50	1.58	[cm]
78 Epaisseur Béton banché	e-BB	14.50	15.00	15.50	[cm]
79 Epaisseur LDV ISOCONFORT 35	e-LDV35	39.50	40.00	40.50	[cm]
80 Epaisseur Tuiles Terre Cuite	e-Tuiles	1.43	1.50	1.58	[cm]
81 Epaisseur LDV ISOCONFORT 32	e-LDV32	9.50	10.00	10.50	[cm]
82 Epaisseur Polystyrène Roofmate	e-PolystToit	19.50	20.00	20.50	[cm]
83 Epaisseur Argile ou limon	e-Terre	95.00	100.00	105.00	[cm]
84 λ Polystyrène extrudé Styrofoam	λ -PolystPb	0.027	0.030	0.033	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
85 λ Dalle plein en béton armé	λ -Dalle	2.34	2.50	2.66	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
86 λ Chape béton	λ -Chape	1.60	1.75	1.90	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
87 λ Carrelage	λ -Carrelage	0.36	0.41	0.46	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
88 λ Placoplatre BA 13	λ -Placo	0.28	0.33	0.38	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
89 λ Lamé d'air 15 cm	λ -LameAir	0.84	0.94	1.03	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
90 λ Plancher poutrelles + hourdis (16+4)	λ -PIPoutrelles	0.96	1.05	1.14	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$

Annexes

91 λ Plâtre gypse (1cm)	λ -Platre	0.38	0.43	0.48	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
92 λ Laine de verre	λ -LDV	0.038	0.041	0.044	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
93 λ Crépis	λ -Crepis	0.62	0.70	0.78	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
94 λ Polystyrène extrudé Wallmate	λ -PolystMur	0.027	0.030	0.033	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
95 λ Enduit hydrofuge	λ -Enduit	0.92	1.00	1.77	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
96 λ Béton banché	λ -BB	1.60	1.75	1.90	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
97 λ LDV ISOCONFORT 35	λ -LDV35	0.032	0.035	0.039	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
98 λ Tuiles Terre Cuite	λ -Tuiles	2.11	2.20	2.29	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
99 λ LDV ISOCONFORT 32	λ -LDV32	0.029	0.032	0.035	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
100 λ Polystyrène Roofmate	λ -PolystToit	0.026	0.029	0.032	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
101 λ Argile ou limon	λ -Terre	1.35	1.50	1.65	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
102 C_{vol} Polystyrène extrudé Styrofoam	Cvol-PolystPb	44	49	54	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
103 C_{vol} Dalle plein en béton armé	Cvol-Dalle	2181	2400	2619	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
104 C_{vol} Chape béton	Cvol-Chape	1891	2112	2333	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
105 C_{vol} Carrelage	Cvol-Carrelage	1090	1200	1310	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
106 C_{vol} Placoplatre BA 13	Cvol-Placo	599	679	759	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
107 C_{vol} Lame d'air 15 cm	Cvol-LameAir	1.1	1.2	1.3	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
108 C_{vol} Plancher poutrelles + hourdis (16+4)	Cvol-PlPoutrelles	443	518	593	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
109 C_{vol} Plâtre gypse (1cm)	Cvol-Platre	1088	1200	1312	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
110 C_{vol} Laine de verre	Cvol-LDV	22	26	29	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
111 C_{vol} Crépis	Cvol-Crepis	1267	1400	1533	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
112 C_{vol} Polystyrène extrudé Wallmate	Cvol-PolystMur	44	49	54	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
113 C_{vol} Enduit hydrofuge	Cvol-Enduit	1631	1800	1969	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
114 C_{vol} Béton banché	Cvol-BB	1906	2116	2326	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
115 C_{vol} LDV ISOCONFORT 35	Cvol-LDV35	7	10	13	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
116 C_{vol} Tuiles Terre Cuite	Cvol-Tuiles	1941	2033	2125	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
117 C_{vol} LDV ISOCONFORT 32	Cvol-LDV32	7	10	13	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
118 C_{vol} Polystyrène Roofmate	Cvol-PolystToit	44	49	54	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
119 C_{vol} Argile ou limon	Cvol-Terre	2906	3128	3349	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
120 $h_{c,int}$ plancher bas sur Vide Sanitaire	hciPbVS	1.42	1.78	2.14	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
121 $h_{c,int}$ plancher haut sur Grenier ventilé	hciPhGV	3.67	4.59	5.51	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
122 h_c plancher intermédiaire	hcPi	0.90	3.00	3.00	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$

Annexes

123 $h_{c,int}$ paroi verticale (PvExt, PvIntérieure, PvInterne)	hciPv	1.00	3.29	6.00	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
124 $h_{c,int}$ paroi en contact avec le sol	hciSol	1.00	4.59	6.00	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
125 $h_{c,ext}$ paroi verticale exposition normale	hcePvExt	5.60	14.90	24.67	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
126 $h_{c,int}$ plancher bas sur Vide Sanitaire	hcePbVS	2.66	3.33	4.00	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
127 $h_{c,int}$ plancher haut sur Grenier ventilé	hcePhGV	3.20	4.00	4.80	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
128 $h_{r,int}$ plancher bas sur Vide Sanitaire	hriPbVS	3.91	4.89	5.87	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
129 $h_{r,int}$ plancher haut sur Grenier ventilé	hriPhGV	3.87	4.84	5.81	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
130 h_r plancher intermédiaire	hrPi	4.00	5.00	6.00	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
131 $h_{r,int}$ paroi verticale (PvExt, PvIntérieure, PvInterne)	hriPv	4.84	4.84	5.13	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
132 $h_{r,int}$ paroi en contact avec le sol	hriSol	4.89	4.89	5.13	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
133 $h_{r,ext}$ paroi verticale exposition normale	hrePvExt	3.30	3.30	4.63	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
134 $h_{r,int}$ plancher bas sur Vide Sanitaire	hrePbVS	2.34	2.92	3.50	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
135 $h_{r,int}$ plancher haut sur Grenier ventilé	hrePhGV	2.51	3.14	3.77	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
136 Pont thermique Salon $\leftrightarrow$ Ext	Psi-SalExt	3.85	4.27	4.69	$[W.K^{-1}]$
137 Pont thermique Salon $\leftrightarrow$ VS	Psi-SalVs	1.04	1.21	1.38	$[W.K^{-1}]$
138 Pont thermique Cellier $\leftrightarrow$ Ext	Psi-CelExt	0.61	0.80	0.99	$[W.K^{-1}]$
139 Pont thermique Cellier $\leftrightarrow$ VS	Psi-CelVs	0.15	0.23	0.31	$[W.K^{-1}]$
140 Pont thermique DgtRdj $\leftrightarrow$ Ext	Psi-DgtRdjExt	0.38	0.43	0.48	$[W.K^{-1}]$
141 Pont thermique DgtRdj $\leftrightarrow$ VS	Psi-DgtRdjVs	0.05	0.08	0.11	$[W.K^{-1}]$
142 Pont thermique Hall $\leftrightarrow$ Ext	Psi-HallExt	0.68	0.88	1.08	$[W.K^{-1}]$
143 Pont thermique Hall $\leftrightarrow$ VS	Psi-HallVs	0.23	0.28	0.33	$[W.K^{-1}]$
144 Pont thermique Ch1 $\leftrightarrow$ Ext	Psi-Ch1Ext	1.05	1.22	1.39	$[W.K^{-1}]$
145 Pont thermique Ch1 $\leftrightarrow$ Combles	Psi-Ch1Comb	0.14	0.16	0.18	$[W.K^{-1}]$
146 Pont thermique Ch2 $\leftrightarrow$ Ext	Psi-Ch2Ext	1.26	1.42	1.58	$[W.K^{-1}]$
147 Pont thermique Ch2 $\leftrightarrow$ Combles	Psi-Ch2Comb	0.14	0.16	0.18	$[W.K^{-1}]$
148 Pont thermique Ch3 $\leftrightarrow$ Ext	Psi-Ch3Ext	1.26	1.42	1.58	$[W.K^{-1}]$
149 Pont thermique Ch3 $\leftrightarrow$ Combles	Psi-Ch3Comb	0.14	0.16	0.18	$[W.K^{-1}]$
150 Pont thermique DgtR+1 $\leftrightarrow$ Ext	Psi-DgtR+1Ext	0.36	0.40	0.44	$[W.K^{-1}]$
151 Pont thermique DgtR+1 $\leftrightarrow$ Combles	Psi-DgtR+1Comb	0.04	0.04	0.04	$[W.K^{-1}]$
152 Pont thermique Sdb $\leftrightarrow$ Ext	Psi-SdbExt	0.90	1.05	1.20	$[W.K^{-1}]$
153 Pont thermique Sdb $\leftrightarrow$ Combles	Psi-SdbComb	0.11	0.12	0.13	$[W.K^{-1}]$

Annexe D - Indicateurs de mesure de la qualité des solutions

D-1 - INDICATEURS NE NÉCESSITANT PAS LA CONNAISSANCE DU FRONT DE PARETO OPTIMAL

Dans cette présentation, nous reprenons les notations du chapitre 1, à savoir :

- E , l'espace de recherche ou l'espace de décision, de dimension d ($d \in \mathbb{N}^*$).
- $\mathcal{F}: E \mapsto \mathbb{R}^{n_{\mathcal{F}}}$, une fonction de plusieurs variables ($x = (x_1, \dots, x_d)$) de E à valeurs réelles dans $\mathbb{R}^{n_{\mathcal{F}}}$. $\mathcal{F}$ a $n_{\mathcal{F}}$ composantes ($n_{\mathcal{F}} \in \mathbb{N}^*$) notées $(f_1, f_2, \dots, f_{n_{\mathcal{F}}})$.

❖ L'indicateur hypervolume (ou métrique s)

Soit $A = (x_1, x_2, \dots, x_{n_A}) \subseteq E$ un sous-ensemble de n_A points non dominés de l'espace de recherche (en pratique, A représentera le génotype de n_A individus non-dominés). Soit $r = (r_1, r_2, \dots, r_{n_{\mathcal{F}}})$ un point de référence de $F = \mathcal{F}(E)$ l'espace des fonctions objectifs, choisi arbitrairement⁹² (en pratique, r correspondra au phénotype d'un individu peu performant, idéalement, au point Nadir du problème). Une définition de l'hypervolume, également appelée métrique s , est donnée par Zitzler (1999). Nous reprenons ici sa définition. L'indicateur hypervolume de A par rapport à r , noté $s(A, r)$, correspond à l'hypervolume intérieur délimité par l'union de polytopes $(p_1, p_2, \dots, p_{n_A})$ où chaque p_i ($i \in \llbracket 1; n_A \rrbracket$) est formé par les intersections des hyperplans suivants, découlant des x_i le long des axes : pour chaque axe de l'espace des fonctions objectifs, il existe $n_A + 1$ hyperplans perpendiculaires à cet axe et passant respectivement par les points $(f_1(x_i), f_2(x_i), \dots, f_{n_{\mathcal{F}}}(x_i))$ et le point r .

Si cette définition peut paraître technique dans sa formulation générale, elle est facilement appréhendable par un exemple en dimension 2, que nous illustrons dans la Figure D-6 pour un ensemble A à trois éléments x_1, x_2 et x_3 . Les hyperplans sont alors des droites perpendiculaires à f_1 ou f_2 et passant respectivement par les points $a_1 = \mathcal{F}(x_1)$, $a_2 = \mathcal{F}(x_2)$, $a_3 = \mathcal{F}(x_3)$ et r , les polytopes (p_1, p_2, p_3) des rectangles, et l'hypervolume $s(A, r)$, l'aire de l'union de ces rectangles.

⁹² Pour assurer que la valeur de l'hypervolume soit positive, r est par convention choisi de manière à ce que ses coordonnées majorent les coordonnées correspondantes de tous les points de A .

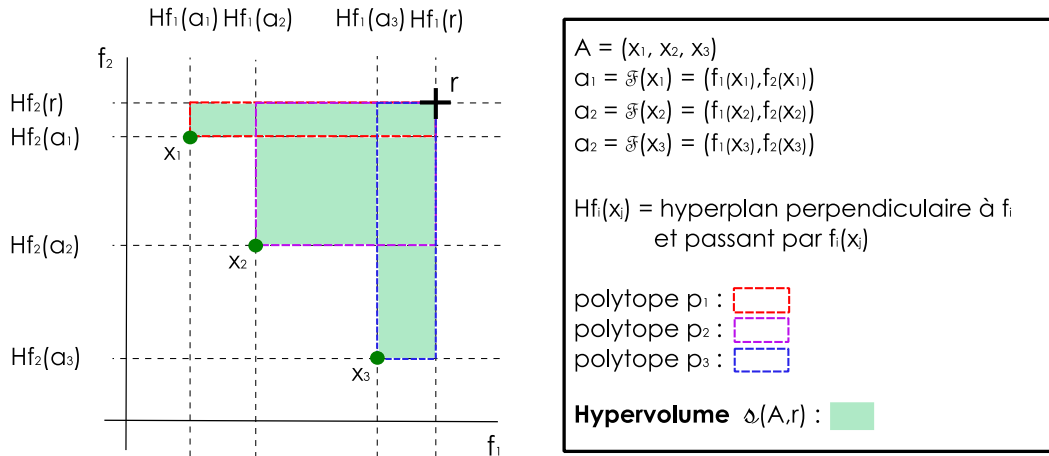


Figure D-6. Illustration de la construction de l'hypervolume en dimension 2

L'indicateur hypervolume est une mesure à la fois de l'intensification et la diversification de la recherche comme l'illustre la Figure D-7. Il est également reconnu par Knowles et Corne (2002) comme l'un des seuls à présenter un critère de monotonie selon la relation de dominance de Pareto, c'est-à-dire : si tout élément d'un ensemble B est dominé par au moins un élément d'un ensemble A , alors l'hypervolume $s(A, r)$, sera supérieur à l'hypervolume $s(B, r)$. Il présente néanmoins les limites d'être sensible au point de référence (p. ex. pour deux points de référence r_1 et r_2 , il est possible d'avoir $s(A, r_1) < s(B, r_1)$ et $s(A, r_2) > s(B, r_2)$) et aux ordres de grandeur des composantes de $\mathcal{F}$. Dans le cas où r est le vecteur nul de F , l'hypervolume de A est alors simplement notée $s(A)$.

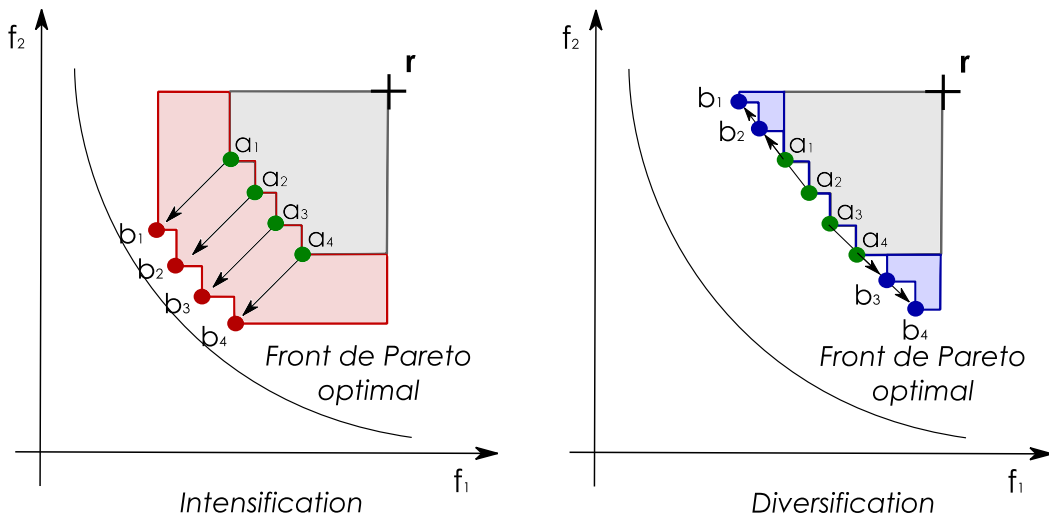


Figure D-7. Comportement de l'hypervolume face à une intensification (gauche) ou une diversification (à droite) de l'ensemble de solutions étudiées

Si la définition de cet indicateur hypervolume est ancienne (Zitzler et Thiele 1998), plusieurs algorithmes de calcul de celui-ci ont été développés plus

récemment (Fonseca et al. 2006). La métrique $\mathcal{J}$ est également à la base de la définition de la métrique $\mathcal{D}$ (permettant de soulever une limite de la métrique $\mathcal{C}$). Ces deux métriques sont présentées ci-après.

❖ L'indicateur de couverture (ou métrique $\mathcal{C}$)

Soit A et B deux sous-ensembles de solutions non-dominées de $F = \mathcal{F}(E)$. L'indicateur de couverture (également appelé métrique $\mathcal{C}$) permet de comparer A et B en évaluant le nombre d'éléments d'un des deux ensembles qui sont faiblement dominés par au moins un élément de l'autre ensemble.

Dans un problème de minimisation, un vecteur x domine faiblement un vecteur y au sens de si et seulement si chacune de ces composantes est inférieure ou égale à celle de y , sans nécessité de présenter au moins une composante strictement inférieure (contrairement à la dominance classique). Cette relation de dominance faible est notée $x \succcurlyeq y$ ou $y \preccurlyeq x$.

La fonction $\mathcal{C}$ transforme les deux surfaces de compris A et B en un nombre réel compris entre 0 et 1, via la relation (5.1) dans le cas d'un problème de minimisation :

$$\mathcal{C}(A, B) = \frac{\text{Card}(\{b \in B \mid \exists a \in A, a \succcurlyeq b\})}{\text{Card}(B)} \quad (\text{A.1})$$

avec $\text{Card}(\bullet)$, l'opérateur retournant le cardinal d'un ensemble fini. La valeur $\mathcal{C}(A, B) = 1$ signifie alors que tous les points de B sont faiblement dominés par ceux de A , et la valeur $\mathcal{C}(A, B) = 0$ signifie qu'aucun point de B n'est faiblement dominé par un point de A . $\mathcal{C}(A, B)$ n'étant pas nécessairement égal à $1 - \mathcal{C}(B, A)$, les deux directions sont à prendre en compte. Selon cette métrique, A sera meilleur que B si $\mathcal{C}(A, B) > \mathcal{C}(B, A)$. Cette méthode a pour avantage de présenter un faible coût de calcul et n'est pas affectée par les différences d'ordres de grandeur entre les fonctions objectifs. Pour être valide, elle nécessite une cardinalité identique entre les deux ensembles et une répartition des solutions similaire. Enfin, si cette méthode permet des comparaisons d'ensembles deux à deux, elle n'assure pas de pouvoir réaliser un classement entre davantage d'ensembles. En effet, pour trois ensembles A , B , et C , il est possible d'obtenir : $\mathcal{C}(A, B) < \mathcal{C}(B, A)$, $\mathcal{C}(B, C) < \mathcal{C}(C, B)$ et $\mathcal{C}(C, A) < \mathcal{C}(A, C)$.

❖ L'indicateur de différence de couverture (ou métrique $\mathcal{D}$)

L'indicateur de différence de couverture (ou métrique $\mathcal{D}$) a été proposé comme une alternative à la métrique $\mathcal{C}$ pour pallier au problème illustré Figure D-8 (à gauche), dans le cas d'un problème de maximisation. Le front 2 est en fait plus proche du front de Pareto optimal que le front 1 alors qu'ils sont considérés égaux selon la métrique $\mathcal{C}$ (valant 50 % pour les deux). Soit A et B deux ensembles d'éléments non-dominés, la métrique $\mathcal{D}$ est définie par la relation (A.2) suivante :

$$\mathcal{D}(A, B) = s(A + B) - s(B) \quad (\text{A.2})$$

Pour reprendre l'exemple de la Figure D-8, si A est le front 1, B le front 2, α est l'aire couverte par A et non par B , β est l'aire couverte par B et non par A , et γ l'aire couverte par A et B , alors $\mathcal{D}(A, B) = \alpha$ et $\mathcal{D}(B, A) = \beta$ à partir de (A.3) :

$$\begin{cases} \alpha + \gamma = s(A) \\ \beta + \gamma = s(B) \\ \alpha + \beta + \gamma = s(A + B) \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Dans cet exemple, $\mathcal{D}(B, A) > \mathcal{D}(A, B)$ ce qui traduit bien la différence de qualité de ces deux fronts, contrairement à la métrique $\mathcal{C}$. De plus, si $\mathcal{D}(A, B) = 0$ et $\mathcal{D}(B, A) > 0$ alors il peut être conclu que A domine B . Cette définition, donnée ici implicitement avec le vecteur nul comme point de référence, peut être facilement généralisable à tout point r de F .

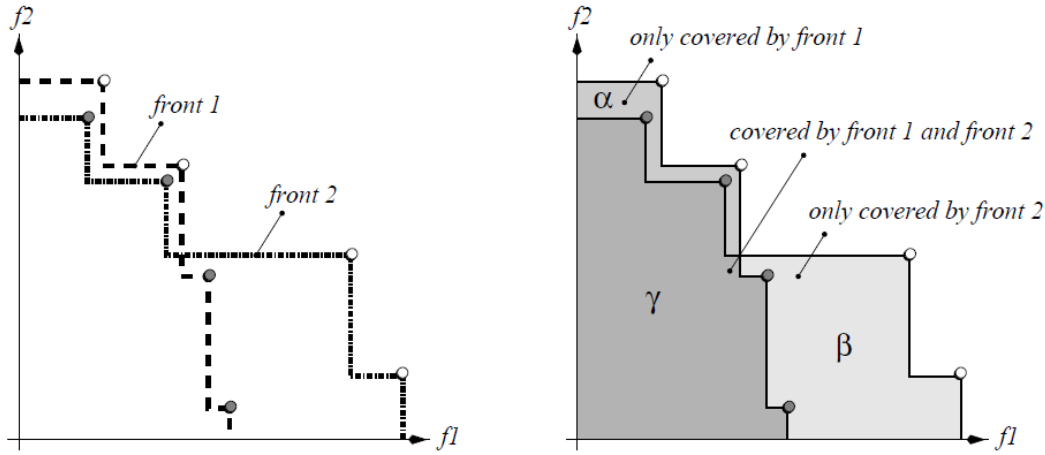


Figure D-8. Illustration d'un problème potentiel avec la métrique $\mathcal{C}$ (gauche) et de l'alternative proposée à l'aide de la métrique $\mathcal{D}$ dans le cas d'un problème de maximisation, tirée de Zitzler (1999)

❖ L'indicateur d'espacement (de Schott)

Cette métrique, introduite par Schott (1995), permet de mesurer l'uniformité de la répartition dans F d'un ensemble $A = (x_1, x_2, \dots, x_{n_A})$ de n_A solutions non-dominées de E . Pour rappel, les x_i ($i \in \llbracket 1; n_A \rrbracket$) correspondent à des vecteurs de l'espace de recherche (ou aux génotypes des n_A individus). Notée SS pour « Scott's Spacing », elle est définie selon la relation (A.4) suivante :

$$SS(A) = \sqrt{\frac{1}{n_A - 1} \cdot \sum_{i=1}^{n_A} (\bar{d} - d'_i)^2} \quad (\text{A.4})$$

avec :

- $d'_i = \min_j (|f_1(x_i) - f_1(x_j)| + |f_2(x_i) - f_2(x_j)| + \dots + |f_{n_F}(x_i) - f_{n_F}(x_j)|)$,
 $\forall i, j \in \llbracket 1; n_A \rrbracket$ et $i \neq j$;
- $\bar{d}$: la moyenne des d_i , $\forall i \in \llbracket 1; n_A \rrbracket$

Une valeur de zéro signifie, au sens de cette métrique, que tous les éléments de A sont espacés de manière égale les uns des autres.

À l'instar des métriques s , $\mathcal{C}$, et $\mathcal{D}$, l'espacement de Scott ne requiert pas la connaissance du front de Pareto optimal. Nous présentons à présent trois indicateurs construits, à l'inverse, sur la connaissance de ce front.

D-2 - INDICATEURS NÉCESSITANT LA CONNAISSANCE DU FRONT DE PARETO OPTIMAL

❖ La distance générationnelle

Cet indicateur mesure une distance entre le front de Pareto optimal et un ensemble A_F de n_A solutions non-dominées de $F = \mathcal{F}(E)$:

$$D_p = \frac{(\sum_{i=1}^n d_i^p)^{\frac{1}{p}}}{n} \quad (\text{A.5})$$

avec :

- d_i : la distance euclidienne entre l'élément i de A_F et l'élément le plus proche de front de Pareto optimal ;
- p , une constante, souvent égale à 2.

Cet indicateur nécessite un faible coût de calcul et fournit uniquement une information sur la convergence des solutions vers le front de Pareto optimal (intensification de la recherche), et non sur la diversité de ces solutions (diversification de la recherche). De plus, cet indicateur est sensible aux différences d'ordre de grandeur entre les fonctions objectifs, tout comme la distance générationnelle. Notons enfin que si $p = 1$ et les d_i normalisées, alors cet indicateur est équivalent à la métrique de convergence utilisée par Deb et Jain (2002).

❖ La proportion d'erreur

L'indicateur de proportion d'erreur, noté E_R (pour « *Error Ratio* ») et proposé par Van Veldhuizen (1999), correspond à la proportion d'individus d'un ensemble A de n_A solutions non-dominées dans F n'appartenant pas au front de Pareto optimal.

$$E_R = \frac{\sum_{i=1}^{n_A} e_i}{n_A} \quad (\text{A.6})$$

avec :

- $e_i = \begin{cases} 0, & \text{si la solution } i \text{ appartient au front de Pareto optimal} \\ 1, & \text{sinon} \end{cases}$;

Plus E_R est faible, plus l'ensemble A est proche du front de Pareto optimal. Si $E_R = 0$, alors tous les éléments de A appartiennent à ce front optimal, noté P^* . Si de plus, $Card(A) = Card(P^*)$ alors A correspond au front de Pareto optimal.

❖ L'erreur maximale par rapport au front de Pareto optimal

Soit un ensemble $A = (x_1, x_2, \dots, x_{n_A})$ de n_A solutions non-dominées de E , et $P' = (p'_1, p'_2, \dots, p'_{n_{P'}})$ le front de Pareto optimal dans E (i.e. le génotype des meilleurs individus du problème). L'erreur maximale de A par rapport au front de Pareto optimal, notée $MPFE(A)$ (« *Maximum Pareto Front Error* ») est définie par l'expression (A.7) suivante :

$$\max_j \left(\min_i \left(\sum_{k=1}^{n_{\mathcal{F}}} |f_k(x_i) - f_k(p'_j)|^p \right) \right)^{\frac{1}{p}} \quad (\text{A.7})$$

avec :

- $i \in \llbracket 1; n_A \rrbracket$, l'indice concernant les éléments de A ;
- $j \in \llbracket 1; n_{P'} \rrbracket$, l'indice concernant les éléments de P' ;
- $k \in \llbracket 1; n_{\mathcal{F}} \rrbracket$, l'indice concernant les composantes de $\mathcal{F}$;
- p , une constante (souvent égale à 2).

Cet indicateur représente ainsi la distance maximale, parmi l'ensemble des éléments du front de Pareto optimal, entre un point de ce front et l'élément de A le plus proche de ce point. L'information fournie par cet indicateur sur l'ensemble A est donc plus locale et pessimiste que globale et moyenne puisque c'est la pire des distances existantes qui est retenue. Un ensemble globalement très proche du front optimal mais avec une solution très éloignée présentera ainsi une valeur plus élevée qu'un ensemble globalement moins proche du front mais sans solution très éloignée de celui-ci.

Annexe E - Convention de nommage pour la BlackBox COMFIE (version au 18/06/2015)

Tableau E-2 : Tableau récapitulant la convention de nommage à appliquer selon le paramètre considéré

Préfixe	Signification	Format à appliquer	Unité	Conditions d'utilisation
Alb	Albédo	Préfixe_Nom_Pléiades_de_l'albedo	± % (par rapport à la valeur de base)	
Lat	Latitude	Préfixe	°	
Tsl	Température du sol	Préfixe	°C	Valeur entière dans COMFIE / Faire attention aux valeurs d'entrée
Tex	Température de l'air extérieur	Préfixe	± °C (par rapport à la valeur de base)	
Gho	Rayonnement solaire global horizontal	Préfixe	± % (par rapport à la valeur de base)	Pour 10%, écrire 10
Dho	Rayonnement solaire diffus horizontal	Préfixe	± % (par rapport à la valeur de base)	
Ori	Orientation du bâtiment	Préfixe	± ° (par rapport à la valeur de base)	Variation selon le sens horaire / Valeur entière dans COMFIE / Faire attention aux valeurs d'entrée

Tco	Scénario de consigne de température de chauffage	Préfixe_Nom_Pléiades_du_scénario_de_chauffage Préfixe_Glob (pour toutes les zones où est appliqué un scénario de chauffage)	± % (par rapport à la valeur de base)	
Qve	Scénario de ventilation non contrôlée	Préfixe_Nom_Pléiades_du_scénario_de_ventilation_no n_contrôlée (VNC) Préfixe_Glob (pour toutes les zones où est appliqué un scénario de VNC)	± % (par rapport à la valeur de base)	
Qvc	Scénario de ventilation contrôlée	idem que Qve	idem que Qve	idem que Qve
Pdi	Scénario de puissance dissipée	idem que Qve	± % (par rapport à la valeur de base)	
Pch	Puissance maximale de chauffage	Préfixe_Nom_Pléiades_de_la_zone Préfixe_Glob (pour toutes les zones où est appliqué une consigne de chauffage)	kW % si Glob	
Foc	Facteur d'occultation (variation du pourcentage d'occultation)	Préfixe_Nom_Pléiades_du_scénario_d'occultation Préfixe_Glob (pour toutes les zones où est appliqué un scénario d'occultation)	± % (par rapport à la valeur de base)	Ne s'applique qu'à des scénarios annuels ou hebdomadaires mais appliqués sur l'année
Occ	Scénario d'occupation	Préfixe_Nom_Pléiades_du_scénario_d'occupation Préfixe_Glob (pour toutes les zones où est appliqué ce scénario)	± % (par rapport à la valeur de base)	
Roc	Résistance supplémentaire d'occultation	Préfixe_Nom_Pléiades_du_scénario_d'occultation Préfixe_Glob (pour toutes les zones où est appliqué un scénario d'occultation)	(m. ² K)/W ± % si Glob	

Inf	Débit d'infiltration	Préfixe_Nom_Pléiades_de_la_zone Préfixe_Glob (pour toutes les zones où est appliqué un débit d'infiltration)	vol/h ± % si Glob	
Uwf	Coefficient de déperdition fenêtre	Préfixe_Nom_Pléiades_de_la_fenêtre	W/(m².K)	
Swf	Surface fenêtre	Préfixe_Nom_Pléiades_de_la_fenêtre	m²	
Eps	Émissivité surface	Préfixe_Nom_Pléiades_de_l'état_de_surface	Nombre adimensionnel entre 0 et 1	
Alp	Absorptivité surface	Préfixe_Nom_Pléiades_de_l'état_de_surface	Nombre adimensionnel entre 0 et 1	
Sow	Facteur solaire	Préfixe_Nom_Pléiades_de_la_fenêtre	%	Pour 10%, écrire 10
Epa	Épaisseur d'un matériau dans une composition	Préfixe_Nom_Pléiades_du_matériau	cm	Toutes les instances du matériau sont modifiées.
Con	Conductivité d'un matériau	Préfixe_Nom_Pléiades_du_matériau	W/(m.K)	

CvI	Capacité volumique d'un matériau	Préfixe_Nom_Pléiades_du_matériau	$\text{kJ}/(\text{m}^3.\text{K})$
Cp m	Capacité thermique massique	Préfixe_Nom_Pléiades_du_matériau	$\text{Wh}/(\text{kg}.\text{K})$
Rho	Masse volumique	Préfixe_Nom_Pléiades_du_matériau	kg/m^3
Hci	Coefficient de convection interne	HciPbVS (pour plancher_bas_vide_sanitaire) HciPhGV (pour plancher haut grenier ventilé) HciPv (pour paroi verticale) HciPi (pour plancher intermédiaire) HciSol (pour sol)	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Hri	Coefficient de rayonnement interne	HriPbVS (pour plancher_bas_vide_sanitaire) HriPhGV (pour plancher haut grenier ventilé) HriPv (pour paroi verticale) HriPi (pour plancher intermédiaire) HriSol (pour sol)	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Hce	Coefficient de convection externe	HcePbVS (pour plancher_bas_vide_sanitaire) HcePhGV (pour plancher haut grenier ventilé) HcePvext	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$
Hre	Coefficient de rayonnement externe	HrePbVS (pour plancher_bas_vide_sanitaire) HrePhGV (pour plancher haut grenier ventilé)	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$

HrePvext		
Psi	Ponts thermiques	Préfixe_Nom_Pléiades_de_la_zone (pour tous les ponts thermiques d'une zone) $\pm$ % (par rapport à la Préfixe_Glob (pour tous les ponts thermiques de toutes les zones) valeur de base)

Annexe F - Notice d'utilisation de la neqBlackBox

Cette annexe correspond à une notice d'utilisation interne de la *BlackBox novaEQUER* (également appelée « *neqBlackBox* » ou « *neqBB* ») développé par M.-L. Pannier et T. Recht. Elle a été rédigée durant la phase de généralisation. Si davantage de paramètres pouvant être modifiés ont été rendus disponibles depuis, le reste des informations présentées est toujours valable.

F-1 - FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL

La *neqBlackBox* permet d'effectuer des variations paramétriques automatisées, sans avoir à passer par l'interface de la version commerciale de *novaEQUER*. Trois types d'information sont à transmettre :

1. les options de configuration, sous le format « *.neq-box-cfg* » ;
2. le projet *novaEQUER* de base, sous le format « *.equ* » : ce projet doit avoir été calculé au préalable dans *novaEQUER* avant d'être utilisable par la *neqBB* ;
3. l'ensemble des variations à mener, sous le format « *.neq-box-data* ».

Deux moyens existent pour transmettre ces informations :

1. Avec interface de saisie (Figure F-9). Les trois fichiers sont chargés soit séparément (n°1, 2 et 3 sur la Figure F-9), soit via un fichier unique (n°4 sur la Figure F-9), sous le format « *.neq-box-script* ». Cette interface est obtenue en lançant l'exécutable de la *neqBlackBox* (*neqBlackBox.exe*) ou en l'appelant sans paramètre via une commande système. Le lancement des simulations peut alors s'effectuer via le bouton « *Process* » (n°5 sur la Figure F-9) ;
2. Sans passer interface de saisie. L'exécutable est appelé via une commande système et en passant le fichier « *.neq-box-script* » comme paramètre.

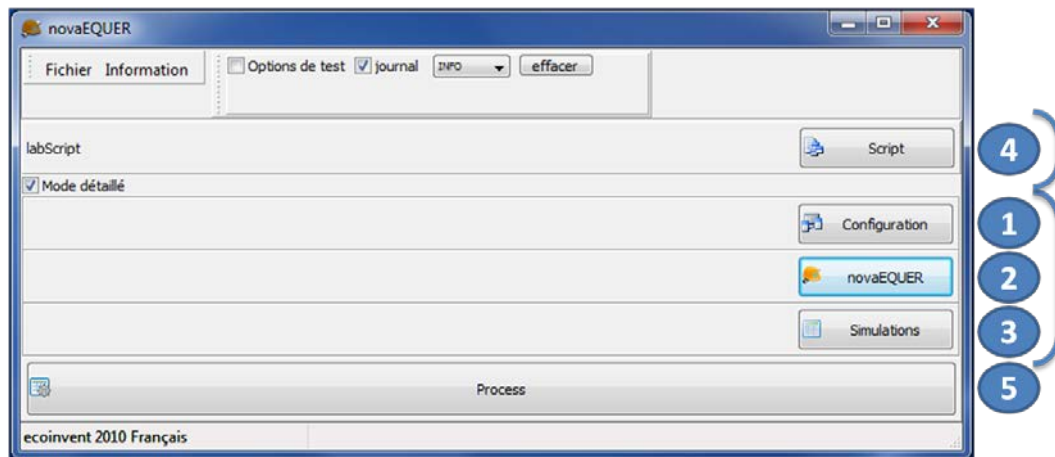


Figure F-9. Interface de saisie de la BlackBox novaEQUER

F-2 - STRUCTURE DU FICHIER « .NEQ-BOX-SCRIPT »

La structure du fichier « .neq-box-script » est illustrée par un exemple simple sur la Figure F-10 où le séparateur est la tabulation.

```

1 C:\Mes données Pleiades+Comfie\Resultats comfie\ProjetExemple\Base\equer\Base
2 summary-path → detailed-summary-path → create-variant → show-progress → process-root
3 C:\Resultats\neg-sum.tab → C:\Resultats\neg-sum-detail.tab → false → false → false
4 id → vol → IsolantExt → surf → FenetreExt → surf → Défaut → chauff → elec-spec → nb-occ
5 SimuNeq000001 → 1.7 → 30 → 1050 → 12800 → 4200 → 1.6
6 SimuNeq000002 → 1.9 → 35 → 1200 → 10300 → 4200 → 1.8
7 ...

```

Figure F-10. Illustration de la structure du fichier « .neq-box-script »

La première ligne correspond au chemin du dossier où se situe la variante « novaEQUER .equ. ». La seconde ligne correspond aux intitulés des options de configuration. La troisième ligne correspond aux valeurs de ces options de configuration. La quatrième ligne correspond aux intitulés des paramètres à modifier. À partir de la cinquième ligne, l'ensemble des jeux de valeurs pour les différents paramètres à faire varier sont fournies. Une ligne correspond au jeu de valeurs pour une simulation.

F-3 - LISTE DES PARAMÈTRES DISPONIBLES

Actuellement, la liste des paramètres disponibles est donnée dans le Tableau F-3. Cette liste va être enrichie pour prendre en compte un plus grand nombre de paramètres issus de *Pléiades+COMFIE* ainsi que des entrées de *novaEQUER*.

Tableau F-3 : Exemples de paramètres qualitatifs

Type	Unité	Description
vol (α)	m ³	Volume de matériaux
surf (α)	m ²	Surfaces des menuiseries et des états de surface
chauff	kWh	Besoin annuel de chauffage (365 jours)
chauff-hour	-	Besoin horaire de chauffage (364 jours). En pratique, c'est l'adresse du fichier .txt contenant les données horaires qui est fournie.
comp	-	Un <i>component</i> représente tout ce qui n'est ni un volume ni une surface, donc potentiellement tout équipement ou autre élément du bâtiment, plus tard les câbles.
CLIM	kWh	Besoin de climatisation annuel
elec-spec	kWh	Consommation annuelle d'électricité spécifique (365 jours)
elec-spec-hour	-	Consommation horaire d'électricité spécifique (364 jours). En pratique, c'est l'adresse du fichier « .txt » contenant les données horaires qui est fournie.
nb-occ	-	Nombre moyen annuel d'occupants
prod-solaire-pv	kWh	Production annuelle d'électricité photovoltaïque (364 jours)
prod-solaire-pv-hour	-	Production horaire d'électricité photovoltaïque (364 jours). En pratique, c'est l'adresse du fichier « .txt » contenant les données horaires qui est fournie.
duree-analyse	année	Durée de l'analyse ; sauf spécification contraire, il s'agit de la durée de vie de tous les matériaux sauf les revêtements, menuiseries et équipements
type-ecs	-	Type d'énergie utilisée pour l'eau chaude sanitaire. Entrer : 0 pour le gaz ; 1 pour le fioul, 2 pour l'électricité ; 3 pour le bois ; 4 pour un réseau de chaleur urbain
type-chauff	-	Type d'énergie utilisée pour le chauffage Entrer : 0 pour le gaz ; 1 pour le fioul, 2 pour l'électricité ; 3 pour le bois ; 4 pour un réseau de chaleur urbain
rdt-ecs	-	Rendement de l'équipement utilisé pour faire l'eau chaude sanitaire ; si aucun rendement n'est spécifié

		alors que le type d'énergie pour l'ECS est indiqué, le rendement utilisé pour le calcul est celui indiqué par défaut dans l'interface pour l'énergie correspondante
rdt-chauff	-	Rendement de l'équipement utilisé pour faire le chauffage ; si aucun rendement n'est spécifié alors que le type d'énergie pour le chauffage est indiqué, le rendement utilisé pour le calcul est celui indiqué par défaut dans l'interface pour l'énergie correspondante

À noter que pour les types « vol » et « surf », le nom du matériau à modifier est aussi à préciser après un séparateur « ▯ ». Par exemple : « vol▯béton » si un matériau nommé « béton » est présent dans le projet « .plp », .

F-4 - OPTIONS DE CONFIGURATION

Le Tableau F-4 fournit une description de l'ensemble des options de configuration pouvant être spécifiées dans le « .neq-box-script ». Les options de configuration peuvent être saisies dans n'importe quel ordre. Par défaut, les options omises sont fixées à « *False* » si elles sont booléennes, et ignorées pour les deux options « summary-path » et « detailed-summary-path » (correspondant à des chemins de fichiers).

Tableau F-4 : Liste des options de configuration

Options	Type	Description
summary-path	String	Chemin où le fichier synthèse (« .tab ») des résultats sera enregistré. Impacts selon les 12 indicateurs environnementaux de <i>novaEQUER</i> pour tout le cycle de vie du bâtiment.
detailed-summary-path	String	Chemin où le fichier synthèse détaillée (« .tab ») des résultats sera enregistré. Impacts décomposés par phase du cycle de vie.
create-variant	Booléen	Sauvegarde, si vrai, l'ensemble des fichiers concernant une variante de simulation dans un dossier. Chaque variante pourra ainsi être rouverte par la suite dans l'interface <i>novaEQUER</i> . Par contre, l'espace disque consommé pourra être important. Requis pour « gen-detail », « gen-ignored-elements », « gen-detail », « gen-step-file », « gen-users-items ».

show-progress	Booléen	Affiche, si vrai, une barre de progression par simulation.
process-root	Booléen	Simule, si vrai, la variante <i>novaEQUER</i> initiale.
group-items	Booléen	Si vrai, regroupe tous les éléments du bâtiment en un seul lot (plus de distinction entre murs intérieurs, extérieurs, le toit...). Laisser ce booléen à 'True' (non opérationnel avec 'False').
gen-xml-building-project	Booléen	Génère, si vrai, un fichier « building-project.xml ». Contient un récapitulatif exhaustif des données bâtiment du projet. Est généré si la variante de base est recalculée.
gen-detail	Booléen	Créé, si vrai, un fichier « all-impacts.xml » par simulation. Contient, grâce à la structure « .xlm », des impacts environnementaux détaillés pour les 12 indicateurs. Des « requêtes » peuvent en effet être faites afin de connaître les impacts par paroi, par phase du cycle de vie, par zone pour les consommations énergétiques, par élément du bâtiment.
gen-step-file	Booléen	Génère, si vrai, deux fichiers « exportPl.stp » et « exportPl-data.stp » par simulation. Contient les impacts des éléments utilisés dans le projet, les données saisies dans l'interface et les données issues de <i>Pléiades</i> : scénarios, consommations, etc.
gen-ignored-elements	Booléen	Génère, si vrai, un fichier « ignored-elements.xml ». Contient l'ensemble des éléments ignorés (c'est-à-dire les éléments pour lesquels l'utilisateur n'a pas fait de correspondance).
gen-user-items	Booléen	Devrait générer, si vrai, un fichier contenant l'ensemble des données environnementales créées par l'utilisateur. Pour l'instant, ne fonctionne pas.

Les résultats obtenus représentent :

1. les impacts du bâtiment sur l'ensemble du cycle de vie, selon les douze impacts environnementaux calculés par *novaEQUER* ;
2. les impacts du bâtiment par phase du cycle de vie, selon les douze indicateurs environnementaux calculés par *novaEQUER*.

Cette notice rappelait pour finir ces douzes indicateurs, déjà présentés dans ce manuscrit (Tableau 1-3).

Annexe G - Algorithme de Kung et al. (1975)

Comme annoncé dans le § , la procédure de classement d'un ensemble en fronts de Pareto successifs présente dans le package « *mco* » a été remplacée par une technique plus efficace : celle de l'algorithme de Kung et al. (1975), s'effectuant en deux étapes.

-
1. L'ensemble des individus est trié par ordre décroissant de performance sur le premier objectif. Cet ensemble trié est noté P ;
 2. Soient A et B deux sous-ensembles de P .

La procédure récursive suivante est alors appliquée, selon le principe « diviser pour mieux régner » :

$$Front(P) : P \rightarrow M$$

$$\begin{cases} \text{si } Card(P) = 1 \text{ alors } M = P \\ \text{si } Card(P) \neq 1 \text{ alors } \begin{cases} A = Front(\{P^{(1)}, \dots, P^{(Card(P)/2)}\}) \\ B = Front(\{P^{(Card(P)/2+1)}, \dots, P^{(Card(P))}\}) \end{cases} \end{cases}$$

Si le i -ème individu non dominé de B est non dominé par l'ensemble des individus de A , alors :

$$M = A \cup \{i\}$$

La complexité de l'algorithme est de $\mathbf{O}\left(N_p \times (\log(N_p))^{d-2}\right)$ avec N_p , le nombre d'individus de P , et d le nombre d'objectifs.

Annexe H - Fonctions de coût

Cette annexe fournit, quand cela n'est pas confidentiel, les données de coûts utilisées pour l'évaluation du critère de différence de coût de construction. Ces données sont basées sur les informations transmises par les partenaires (constructeur, industriels)

❖ Coût en € HT d'un m² de paroi (de murs ou de toiture) en fonction de l'épaisseur de laine de verre

Cette fonction est basée sur des données de coûts confidentielles. Elle prend la forme d'une fonction affine où un surcoût de 40 € / m² est considéré lorsqu'il s'agit d'une paroi de toiture par rapport à une paroi de murs.

❖ Coût en € HT d'un m² de plancher bas (hors fondation) en fonction de l'épaisseur des hourdis polystyrène

Cette fonction est basée sur des données de coûts confidentielles. Elle prend la forme d'une fonction polynôme du second degré.

❖ Coût en € HT d'une menuiserie en fonction de son épaisseur et du type de vitrage

- Si la menuiserie est en double-vitrage : la fonction est basée sur des données de coûts confidentielles. Elle prend la forme d'une fonction affine ;
- Si la menuiserie est en triple-vitrage : un surcoût de 40 € est considéré sur le coût de la menuiserie de surface équivalente en double-vitrage.

❖ Coût en € HT du système de ventilation en fonction de son type

- Si le système de ventilation est de type simple-flux : 400 € ;
- Si le système de ventilation est de type simple-flux :
- 2 500 € pour une maison avec étage ;
- 1 500 € pour une maison de plain-pied.

❖ Coût en € HT de l'installation d'un récupérateur de chaleur sur eaux grises

Le coût de l'installation est estimé à : 1 000 €.

❖ Coût en € HT de l'installation photovoltaïque en fonction du nombre de modules

Cette fonction prend la forme d'une fonction affine avec $a = 250 \times 3$ et $b = 1 500$. En effet, un coût au kWc de 3 € a été considéré, et le coût de raccordement à, quant à lui, été évalué à 1 500 €.

Liste des figures

Figure 0-1. Liens entre activités humaines et états du système Terre, tirée de Bai et al. (2015).....	2
Figure 0-2. Consommation mondiale d'énergie primaire, tirée de GEA (2012) d'après Nakićenović et al. (1998) et Grubler (2008)	4
Figure 1-1. Exigences des standards MINERGIE pour les nouvelles constructions, tirée de MINERGIE (2016)	17
Figure 1-2. Exigences des labels Passive House Classic, Plus, et Premium concernant la demande et la génération d'énergie primaire renouvelable, tirée de Passipedia (2016).....	21
Figure 1-3. Options possibles de fourniture d'ENR, tirée de Marszal et al. (2010)	24
Figure 1-4. Représentation des trois types de bilan NZEB, tirée de Sartori et al. (2012).....	27
Figure 1-5. Illustration des indicateurs « load matching » et « grid interaction » sur le bâtiment allemand du Solar Decathlon Europe 2010, tirée de Voss et al. (2010).....	31
Figure 1-6. Les quatre étapes pour atteindre le « nearly zero energy building » (nZEB) selon le prEN 15603, tirée de Zirngibl (Zirngibl 2014).....	34
Figure 1-7. Frontières physiques proposées par REHVA : production « sur site » à gauche, production « à proximité » à droite, tirée de Kurnitski (2013a).....	37
Figure 1-8. Maison I-BB de plateforme INCAS à Chambéry, source : www.cea.fr	41
Figure 1-9. Façade sud de la maison Hölken d'après Fraunhofer-ISE (1992)....	42
Figure 1-10. La maison ZEN, tirée de (Ricaud et Lokhat 2012).....	43
Figure 1-11. Aperçu du lotissement Solarsiedlung de Rold Disch, source : www.rolfdisch.de	44
Figure 1-12. Façades « Sud » de la maison Chloé originale (gauche), et extension (droite) de la surface de panneaux photovoltaïques pour obtenir la certification « Passive House Plus », tirée de La Maison Passive (2016).....	45
Figure 1-13. Plan du rez-de-chaussée (à gauche) et de l'étage (à droite) de la maison Chloé	45

Liste des figures

Figure 1-14. Processus de décision classique lors de la conception d'un bâtiment, d'après Torcellini et Ellis (2006)	52
Figure 1-15. Illustration des courbes de Paulson et de MacLeamy montrant l'intérêt de la phase de conception, et d'un processus de conception intégré (IPD pour « Integrated Process Design » en anglais), tirée de Davis (2013).....	52
Figure 1-16. Illustration des différentes étapes du cycle de vie d'un bâtiment	59
Figure 1-17. Les quatre phases de l'analyse de cycle de vie (ISO 14 040 2006)	60
Figure 1-18. Illustration d'un front de Pareto entre deux critères (F1 et F2), de deux solutions du front (A et B), et d'une solution dominée par le front (C)	69
Figure 1-19. Illustration des points Idéal (I) et Nadir (A ⁺) sur un problème de minimisation à deux critères (f1 et f2).....	70
Figure 2-1. Lien entre incertitude en entrée, sensibilité du modèle et incertitude en sortie, tirée de Chouquet (2007)	93
Figure 2-2 : Illustration du principe de l'analyse d'incertitude, d'après Makowski (2014)	94
Figure 2-3. Échantillonnage (1000 tirages) de type aléatoire (en haut à gauche), stratifié LHS (en haut à droite), stratifié optimisé par critère MaxiMin (en bas à gauche), quasi-aléatoire par séquences de Sobol (en bas à droite) pour deux facteurs d'entrée (x_1 et x_2) dotés respectivement d'une loi uniforme sur l'intervalle [0,1] et d'une loi normale tronquée sur [0,1] ($\mu = 0,5, \sigma = 0,1$)	98
Figure 2-4. Illustration du principe d'une analyse de sensibilité, d'après Makowski (2014).....	99
Figure 2-5. Illustration d'une interaction entre deux facteurs incertains A et B	100
Figure 2-6. Synthèse détaillée des méthodes d'AS, tirée de Iooss (2011).....	103
Figure 2-7. Exemple des trois catégories de facteurs pouvant être identifiées avec la méthode de Morris, d'après Iooss (2009).....	105
Figure 2.8 : Diagramme de décision pour le choix de la méthode d'analyse de sensibilité appropriée Rocquigny et al. (2008).....	108
Figure 2.9 : Méthodologie de validation selon Judkoff et al. (2008).....	113
Figure 2.10 : Méthodologie de validation selon Jensen (1995)	115
Figure 2-11. Protocole expérimental appliqué à la maison I-BB du 01/01/2012 au 22/04/2012.....	126

Liste des figures

Figure 2-12. Exemple d'échantillonnage dans la méthode de Morris, avec $d = 3$ facteurs incertains, $Q = 3$ niveaux, $\Delta = 12$, et $r = 3$ trajectoires (a), (b), (c) à partir de Munaretto (2014)	128
Figure 2-13. Illustration d'une stratification d'un espace par méthode LHS, et d'un échantillonnage associé dans le cas de deux facteurs avec des lois uniformes entre 0 et 1.....	130
Figure 2-14. Graphiques de Morris $\sigma; \mu^*$ pour les six scénarios du protocole expérimental (en °C).....	135
Figure 2-15. Graphiques de Morris $\sigma; \mu$ pour les six scénarios du protocole expérimental (en °C).....	136
Figure 2-16. Classement des 20 facteurs incertains les plus influents selon $maxDj, s^*$	137
Figure 2-17. Bandes d'incertitudes des températures mesurées et simulés dans le séjour.....	140
Figure 2-18. Valeurs de la RMSE entre la série et la courbe des mesures, pour les six scénarios du protocole expérimental.....	141
Figure 2-19. Indices de Sobol principaux, sur les six scénarios du protocole expérimental.....	143
Figure 2-20. Indices de Sobol totaux, sur les six scénarios du protocole expérimental.....	143
Figure 3-1. Les différents niveaux d'organisation dans un algorithme génétique, d'après Souquet et Radet (2004)	149
Figure 3-2. Illustration de la représentation d'un bâtiment en optimisation évolutionnaire dans le cas d'un chromosome.	150
Figure 3-3. Principe général de fonctionnement des algorithmes évolutionnaires	151
Figure 3-4. Illustration d'un codage binaire (gène A), d'un codage sous la forme d'un nombre entier (gène C) et d'un codage sous la forme d'un nombre réel (gène X)	153
Figure 3-5. Illustration des croisements binaires classiques.....	155
Figure 3-6. Illustration de l'adaptation des croisements binaires en croisements discrets, cas d'un croisement à un point de coupure.....	155
Figure 3-7. Distribution de probabilité pour la génération des enfants ; les parents sont marqués par un « o », tirée de Beyer et Deb (2001)	157
Figure 3-8. Illustration d'une mutation binaire survenue sur le bit n° 4.....	157

Figure 3-9. Illustration de la notion de rang associée au front de Pareto, cas d'un problème de minimisation à deux critères	162
Figure 3-10. Illustration de la sélection d'un individu dans une stratégie de sélection par tournoi à 3 individus dans le cas d'une fonction à maximiser.....	162
Figure 3-11. Illustration des deux objectifs en optimisation multicritère : l'intensification (1) et la diversification (2) de l'exploration (cas d'un problème de minimisation à deux critères), d'après Rivallain (2013).....	163
Figure 3-12. Illustration du périmètre de l'hypercube pour la solution i , cas d'un problème de minimisation à deux critères	165
Figure 3-13. Illustration de la robustesse de la variante d'un algorithme aux changements de conditionnement du problème, d'après Eiben et Smit (2011)	180
Figure 3-14. Illustration de la robustesse d'un algorithme aux changements de valeurs de ses paramètres quantitatifs, d'après Eiben et Smit (2011).....	181
Figure 3-15. Illustration de la robustesse de la variante d'un algorithme aux changements de graine aléatoire, d'après Eiben et Smit (2011)	182
Figure 4-1. Partie de l'environnement « Pléiades » sur laquelle se fonde la plateforme développée, d'après http://www.izuba.fr/logiciel	198
Figure 4-2. Les quatre phrases principales du développement de la branche UASA	200
Figure 4-3. Illustration de la plateforme développée pour la conception optimisée.....	204
Figure 4-4. Entrées et sorties de la BlackBox COMFIE	205
Figure 4-5. Entrées et sorties de la BlackBox novaEQUER	207
Figure 4-6. Principales étapes de déroulement lors de l'utilisation de la plateforme	210
Figure 4-7. Illustration du début du script « NSGA2_Interface »	210
Figure 4-8. Illustration des informations générales dans l'exemple retenu	211
Figure 4-9. Illustration des informations générales dans l'exemple retenu	212
Figure 4-10. Illustration de la saisie des informations propres à l'algorithme génétique	213
Figure 4-11. Illustration de la saisie des informations propres à l'espace des décisions (cas des isolants et des surfaces de menuiseries).....	214
Figure 4-12. Illustration de la saisie des informations propres à l'espace des objectifs et des contraintes.....	214

Liste des figures

Figure 4-13. Illustration des options de configuration existantes pour l'optimisation.....	214
Figure 4-14. Options de génération et d'un premier post-traitement de sorties supplémentaires aux objectifs.	215
Figure 4-15. Appel au script « NSGA2_Core » à la fin de la saisie du script « NSGA_Interface ».....	215
Figure 4-16. Mise en évidence de la boucle générationnelle, une des particularités de l'optimisation dans la plateforme logicielle.....	216
Figure 4-17. Illustration de l'arborescence de dossiers de travail créée par la fonction « manageSimulations », dans le cas de l'exemple retenu	217
Figure 4-18. Illustration de graphiques pouvant être générés automatiquement à chaque génération du processus d'optimisation – cas des projections deux à deux des performances des individus de la population de la génération 10 sur 30	220
Figure 4-19. Illustration des graphiques pouvant être générés automatiquement à chaque génération du processus d'optimisation – cas des quatre premières caractéristiques des individus de la population de la génération 21 sur 30.....	221
Figure 4-20. Illustration de sorties du fichier « BilanOptimisation.txt », cas des pourcentages moyens de croisement et de mutation par génération.	222
Figure 4-21. Positionnement du script « SimulationsManagement.R » au sein de la plateforme de simulation, et illustration de la possibilité d'interopérabilité de la chaîne « aval » avec d'autres chaînes « amont » que celle de la plateforme	228
Figure 4-22. Entrées et sorties de la fonction « manageSimulations »	229
Figure 4-23. Suivi proposé à l'utilisateur de l'avancement des simulations	230
Figure 4-24. Gains obtenus par parallélisation sur un processeur multi-cœurs hyperthreadés, tirée de Recht (2013).....	231
Figure 4-25. Illustration de l'interfaçage entre les BlackBox COMFIE et novaEQUER	236
Figure 4-26. Illustration du problème engendré par la fusion des isolants dans COMFIE sur les calculs de la BlackBox novaEQUER.....	237
Figure 4-27. Légende commune mise en place pour le suivi des scripts	241
Figure 4-28. Système de numérotation commun mis en place pour le suivi des scripts.....	241
Figure 5-1. Situation géographique de Meung-Sur-Loire (45)	249

Liste des figures

Figure 5-2. Situation du projet dans le futur lotissement.....	249
Figure 5-3. Plan (non aménagé) et coupe du projet à l'état initial	250
Figure 5-4. Vue des quatre façades de la maison (crédits : Fousse Constructions)	250
Figure 5-5. Rendu 3D de la version finale de la maison, vue Sud (crédits : Fousse Constructions).....	251
Figure 5-6. Rendu 3D de la version finale de la maison, vue Nord (crédits : Fousse Constructions).....	251
Figure 5-7. Zones climatiques selon la RT2012, tirée de : http://www.rt-batiment.fr/	252
Figure 5-8. Masques proches, et modélisation associée (sous Alcyone).....	253
Figure 5-9. Zonage thermique du projet	257
Figure 5-10. Profil moyen d'activités hebdomadaires.....	259
Figure 5-11. Profil moyen d'activités les lundis.....	259
Figure 5-12. Courbes de charges hebdomadaires.	260
Figure 5-13. Scénario hebdomadaire moyen d'occupation pour la zone jour (en %), hors périodes de vacances.....	262
Figure 5-14. Scénario hebdomadaire moyen d'occupation pour la zone nuit (en %), hors périodes de vacances.....	262
Figure 5-15. Consigne de température moyenne pour la zone jour (en °C), hors période de vacances.....	263
Figure 5-16. Consigne de température moyenne pour la zone nuit (en °C), hors période de vacances.....	264
Figure 5-17. Débits à extraire selon l'arrêté du 24 mars 1982 et du 28 octobre 1983, tirée de : http://conseils.xpair.com/consulter_savoir_faire/ventilation_qualite_air/arrete_24_mars_1982/393.htm	265
Figure 5-18. Scénario hebdomadaire moyen de ventilation pour la zone jour (en m3/h), hors périodes de vacances.....	266
Figure 5-19. Scénario hebdomadaire moyen de ventilation pour la zone nuit (en m3/h), hors périodes de vacances.....	266
Figure 5-20. Profil annuel moyen de puissance dissipée par les appareils électriques	267
Figure 5-21. Scénario hebdomadaire moyen de puisage en eau chaude sanitaire (en litres), hors périodes de vacances.....	268

Liste des figures

Figure 5-22. Scénario de surventilation nocturne pour les zones jour et nuit (en %)	269
Figure 5-23. Scénario hebdomadaire d'occultation hivernale pour toutes les zones (en %)	270
Figure 5-24. Scénario d'occultation estivale pour les façades nord-est et sud-est (en %)	271
Figure 5-25. Scénario d'occultation estivale pour les façades nord-ouest et sud-ouest (en %)	271
Figure 5-26. Profil annuel de la température intérieure (référence : en rouge ; gestion des occultations : en orange ; gestion des occultations et mise en place d'une surventilation nocturne : en bleu)	278
Figure 5-27. Flux énergétiques à l'état initial du projet	279
Figure 5-28. Configurations étudiées d'agencement intérieur des pièces de la maison	279
Figure 5-29. Variations paramétriques du pourcentage de surface vitrée par façade, en partant d'une maison « aveugle »	281
Figure 5-30. Diagrammes solaires pour les façades sud-est (à gauche) et sud-ouest (à droite) avec les masques proches affinés	281
Figure 5-31. Traduction du cahier des charges sur les bornes d'exploration de chaque baie vitrée, cas de la configuration n°2	282
Figure 5-32. Ensemble des solutions étudiées sans intégration des contraintes du constructeur (en bleu) puis avec (en vert)	283
Figure 5-33. Illustration des quatre baies vitrées explorées dans le Tableau 5-8	286
Figure 5-34. Évolution du front de Pareto de rang pour l'optimisation « bilan énergétique en fonction du coût de construction »	287
Figure 5-35. Solutions identifiées dans la zone d'intérêt par l'optimisation sans (à gauche) et avec (à droite) la contrainte de bilan énergétique positive	287
Figure 5-36. Ordre des choix les plus efficaces à mettre en œuvre pour tendre vers un meilleur bilan énergétique	289
Figure 5-37. Cas de base, population initiale, et front de Pareto de rang 1 final	291
Figure 5-38. Évolution des fronts de Pareto de rang 1 et front de Pareto optimal	292

Figure 5-39. Caractéristiques des fronts de Pareto approché (rectangles bleus) et optimal (rectangles blancs) concernant les équipements	293
Figure 5-40. Comparaison des fronts de Pareto approchés pour les trois ménages étudiés.....	298
Figure 5-41. Comparaison des caractéristiques des fronts associés à chaque ménage	299
Figure 5-42. Évolution de la température moyenne en surface entre 1986-2005 et 2081-2100 selon le scénario RCP 2,6 (à gauche) et le scénario RCP 8,0 (à droite), tirée de (IPCC 2014)	302
Figure 5-43. Anomalie de température moyenne quotidienne (écart entre la période considérée et la période de référence). Expérience Météo-France/CRNM2014 avec le modèle Aladin. Exemple de résultats en horizon lointain (2071-2100) pour le scénario RCP 4,5, source DRIAS.....	304
Figure 5-44. Boîtes à moustaches des séries temporelles de température d'air extérieur pour les quatre fichiers météorologiques étudiés.....	306
Figure 5-45. Températures moyennes par saison pour les quatre fichiers météorologiques étudiés	307
Figure 5-46. Description statistique du rayonnement global horizontal pour les quatre fichiers météorologiques étudiés (données RCP45 et RCP85 identiques à celles de RT2012)	308
Figure 5-47. Fronts de Pareto approchés pour les quatre fichiers météorologiques étudiés	309
Figure 5-48. Influence du climat sur l'isolation des façades pour les solutions du front de Pareto approché.....	310
Figure 5-49. Influence du climat sur les épaisseurs des hourdis en polystyrène des façades pour les solutions du front de Pareto approché	311
Figure 5-50. Influence du climat sur les épaisseurs de laine de verre en toiture pour les solutions du front de Pareto approché	311
Figure 5-51. Influence du climat sur le type de vitrage sur la façade nord-est pour les solutions du front de Pareto approché	312
Figure 5-52. Influence du climat sur le type de ventilation pour les solutions du front de Pareto approché.....	313
Figure 5-53. Influence du climat sur l'installation d'un récupérateur de chaleur sur eaux grises pour les solutions du front de Pareto approché	314
Figure 5-54. Boîtes à moustaches du taux d'inconfort global des cinq dernières générations d'enfants en fonction du fichier météorologique	315

Liste des figures

Figure 5-55. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations, pour toutes les variantes comparées lors de l'étude préliminaire	319
Figure 5-56. Évolutions du front de Pareto approché (gauche) et de la valeur de l'hypervolume associé à ce front (droite), cas de la variante de référence .	320
Figure 5-57. Évolution du taux de d'amélioration (à gauche) et du taux consolidation (à droite) au cours des évaluations pour les variantes P200M0C100, P200M100C0 et « Référence »	322
Figure 5-58. Évolution du taux de d'amélioration (à gauche) et du taux consolidation (à droite) au cours des évaluations pour les variantes P20M15C80 , P2000M15C80 et « Référence »	323
Figure 5-59. Évolution du taux de doublons dans le front de Pareto en fonction du nombre d'évaluations pour les variantes de l'étude préliminaire	326
Figure 5-60. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations selon cinq graines aléatoires différentes, dans le cas de la variante P2000M15C80	328
Figure 5-61. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations selon cinq graines aléatoires différentes, dans le cas de la variante P100M10C90	328
Figure 5-62. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations pour les douze variantes du plan de Box et Behnken plus la variante de référence	330
Figure 5-63. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations pour les douze variantes du plan de Box et Behnken plus la variante de référence, regroupées selon la taille de la population	331
Figure 5-64. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations pour les variantes à 100 individus	332
Figure 5-65. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations pour les variantes à 200 individus	332
Figure 5-66. Évolution de l'hypervolume en fonction du nombre d'évaluations pour les variantes à 300 individus	333
Figure A-1. Exemple de sorties de l'outil d'évaluation développé par l'AIE (http://task40.iea-shc.org/net-zeb)	372
Figure A-2. Caractéristiques des quatre définitions proposées par l'outil (capture d'écran à partir du logiciel disponible sur le site de l'AIE : http://task40.iea-shc.org/net-zeb)	373
Figure A-3. Organisation du projet COMEPOS par lots et sous-lots de travail	376

Liste des figures

Figure B-4. Bilan électrique annuel de la maison INCAS Béton Banché	378
Figure B-5. Bilans électriques mensuels	380
Figure D-6. Illustration de la construction de l'hypervolume en dimension 2..	388
Figure D-7. Comportement de l'hypervolume face à une intensification (gauche) ou une diversification (à droite) de l'ensemble de solutions étudiées.	388
Figure D-8. Illustration d'un problème potentiel avec la métrique $\mathcal{C}$ (gauche) et de l'alternative proposée à l'aide de la métrique $\mathcal{D}$ dans le cas d'un problème de maximisation, tirée de Zitzler (1999)	390
Figure F-9. Interface de saisie de la BlackBox novaEQUER	399
Figure F-10. Illustration de la structure du fichier « .neq-box-script »	399

Liste des tableaux

Tableau 1-1. Facteurs de conversion d'énergie finale en énergie primaire, d'après (Association Effinergie 2015)	16
Tableau 1-2. Principales caractéristiques des maisons recensées.....	49
Tableau 1-3. Liste des indicateurs considérés dans l'outil novaEQUER	63
Tableau 2-1. Fonctions de densité de probabilité (FDP) des incertitudes sur les 11 facteurs incertains sélectionnés.....	131
Tableau 3-1 : Exemples de paramètres qualitatifs.....	172
Tableau 3-2 : Valeurs optimales obtenues pour les trois paramètres quantitatifs étudiés à l'issue des paramétrages réalisés par Sadeghi et al. (2014) et Mousavi et al. (2016).....	175
Tableau 3-3 : Synthèse des sept indicateurs présentés dans l'Annexe D, permettant de mesurer la qualité des solutions obtenues par un algorithme et ses variantes	178
Tableau 3-4 : Schéma des deux niveaux d'optimisation et terminologie associée	183
Tableau 3-5 : Méthodes de paramétrage selon les classifications T1 et T2 , tiré de Eiben et Smit (2011)	185
Tableau 3-6 : Méthodes de paramétrage selon la classification T3 , tiré de Eiben et Smit (2011)	186
Tableau 4-1 : Problèmes tests considérés lors de la démarche de validation analytique menée, d'après Deb et al. (2002).....	225
Tableau 5-1 : Caractéristiques du système photovoltaïque	256
Tableau 5-2 : Principales caractéristiques socio-démographiques du ménage « Famille », au sens des variables discriminantes retenues dans le modèle stochastique d'occupation	260
Tableau 5-3 : Distances considérées pour le traitement des déchets	272
Tableau 5-4 : Durées de vies pour les menuiseries et les revêtements	273
Tableau 5-5 : Fiches environnementales pour les éléments automatiquement liés entre COMFIE et novaEQUER	274
Tableau 5-6 : Fiches environnementales pour les éléments ajoutés manuellement	275
Tableau 5-7 : Récapitulatif des études d'optimisation menées durant le processus de conception de la maison Fousse Constructions.....	277

Tableau 5-8 : Espace de recherche du problème d'optimisation considéré en phase de conception détaillée	285
Tableau 5-9 : Caractéristiques socio-démographiques des nouveaux ménages étudiés (au sens des variables discriminantes retenues dans le modèle d'occupation). 296	
Tableau 5-10 : Principales caractéristiques énergétiques annuelles (en énergie finale) des trois ménages étudiés	297
Tableau 5-11 : Températures du sol pour les quatre fichiers météorologiques étudiés	307
Tableau 5-12 : Valeurs des paramètres quantitatifs utilisées dans l'étude préliminaire	318
Tableau 5-13 : Niveaux retenus dans le plan de Box et Behnken	329
Tableau C-1. Liste des 153 facteurs incertains pour le criblage de Morris, tiré de Munaretto (2014)	382
Tableau E-2 : Tableau récapitulatif de la convention de nommage à appliquer selon le paramètre considéré	393
Tableau F-3 : Exemples de paramètres qualitatifs	400
Tableau F-4 : Liste des options de configuration	401

Résumé

La généralisation planifiée du Bâtiment à Énergie POSitive est un enjeu important de développement durable, notamment dans une vision à long terme. Cependant, concevoir de tels bâtiments à moindre impact environnemental et à des coûts maîtrisés pour le marché constitue une problématique complexe pour les professionnels du secteur.

Ces travaux de thèse se sont ainsi intéressés au développement d'une méthodologie permettant de fournir une aide à la décision opérationnelle et robuste pour l'écoconception de maisons à énergie positive (MEPOS). Basée sur l'optimisation multicritère (via un algorithme génétique), la démarche proposée associe au sein d'une plateforme multi-outils, simulation thermique dynamique, analyse de cycle de vie, et fonctions de coût de construction pour identifier, sur une base multicritère (front de Pareto) et sur le cycle de vie, des concepts de MEPOS performantes et fournir au décideur une description des meilleurs compromis. Également intégrées dans la plateforme, des méthodes d'analyses de sensibilité et d'incertitude offrent la possibilité de sélectionner les variables de conception les plus influentes en amont de l'optimisation, et d'évaluer le risque de non-robustesse d'une décision en aval de l'optimisation, notamment au regard des incertitudes sur le comportement des occupants (avec un modèle stochastique d'occupation), et de l'évolution prévisible du climat jusqu'à la fin du siècle.

Via une collaboration avec un constructeur, la méthodologie a été appliquée en temps réel durant un processus de conception intégrée d'une MEPOS.

Mots Clés

bâtiment à énergie positive, aide à la décision, optimisation multicritère, analyse de cycle de vie, analyses de sensibilité et d'incertitudes, robustesse des solutions

Abstract

The planned generalisation of plus energy buildings constitutes an important topic for sustainable development, especially in a long-term vision. However, designing such buildings at lower environmental impact and with competitive cost for the market constitutes a complex issue for the sector's professionals.

This thesis focused on the development of a methodology providing an operational and robust decision support to eco-design plus-energy houses. Based on multi-criteria optimisation (via a genetic algorithm), the proposed approach combines in a multi-tools platform, dynamic energy simulation, life cycle assessment, and cost construction functions in order to identify, on a multi-criteria (Pareto front) and life cycle basis, efficient plus-energy houses concepts and to provide decision-maker a description of the best compromises. Also included in the platform, sensitivity and uncertainty analysis methods offer the possibility to select the most influent design variables before optimisation, and to evaluate the non-robustness risk of a decision after optimisation, especially regarding uncertainties on occupants' behaviour (with a stochastic model of occupancy) and climate's predictable evolution up to the end of the century.

Via collaboration with a constructor, the methodology was applied in real-time throughout an integrated design process of a plus-energy house.

Keywords

plus energy building, decision support, multi-criteria optimisation life cycle assessment, sensitivity and uncertainty analysis, solutions' robustness