



HAL
open science

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

Stéphanie Armand Decker

► To cite this version:

Stéphanie Armand Decker. 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. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Bordeaux, 2015. Français. NNT : 2015BORD0189 . tel-01234197

HAL Id: tel-01234197

<https://theses.hal.science/tel-01234197>

Submitted on 26 Nov 2015

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 PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

SPÉCIALITÉ : MÉCANIQUE

Par Stéphanie ARMAND DECKER

**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**

Sous la direction de : Frédéric BOS

Soutenue en public le 22 septembre 2015

Membres du jury :

M. BLANCHET Pierre	Professeur des Universités, Université Laval	Rapporteur
M. INARD Christian	Professeur des Universités, Université La Rochelle	Rapporteur
M. BOUCHAIR Abdel Hamid	Professeur des Universités, Université Blaise Pascal	Président
Mme LARTIGUE Bérange	Maître de Conférences HDR, Université Paul Sabatier	Examinatrice
M. BOS Frédéric	Professeur des Universités, Université de Bordeaux	Directeur de thèse
M. GALIMARD Philippe	Maître de Conférences, Université de Bordeaux	Encadrant de thèse
M. LAGIERE Philippe	Maître de Conférences, Université de Bordeaux/Nobatek	Encadrant de thèse
M. SEMPEY Alain	Maître de Conférences, Université de Bordeaux	Encadrant de thèse

Membre invité :

M. NDIAYE Amadou	Ingénieur de Recherche, INRA	Encadrant de thèse
------------------	------------------------------	--------------------

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

Résumé : Les pays industrialisés cherchent aujourd'hui à réduire leur consommation d'énergie et à utiliser des matières premières de substitution, notamment renouvelables dont le bois fait partie. Pour promouvoir son usage, le développement de méthodes favorisant son recours dans les systèmes constructifs pour la construction multiétage est nécessaire.

La conception d'un bâtiment est multicritère. Des objectifs contradictoires sont à optimiser simultanément. Des solutions de compromis Pareto-optimaux sont par exemple recherchées entre l'atteinte des meilleures performances d'usage et la limitation de l'impact environnemental du bâtiment. Ces travaux portent ainsi sur le développement d'une méthode d'optimisation multiobjectif de systèmes constructifs bois adaptés au multiétage.

Des objectifs de maximisation du confort vibratoire des planchers et de minimisation des besoins de chauffage, d'inconfort thermique, de potentiel de réchauffement climatique et d'énergie grise sont pris en compte. La méthode repose sur un algorithme d'optimisation multiobjectif par essaim particulaire capable de proposer un ensemble de solutions non-dominées constituant le front de Pareto. L'espace des solutions est contraint par des exigences réglementaires nécessaires à la sécurité de l'ouvrage. L'ensemble des fonctions-objectif est modélisé sous forme de fonctions analytiques. Les sorties d'intérêt du modèle de simulation thermique dynamique sont substituées par des métamodèles.

La méthode développée est mise en œuvre sur un cas d'étude. Les résultats obtenus offrent une grande diversité dans un panel de 20 000 solutions optimales. Ces résultats constituent un support de discussion entre les différents acteurs d'un projet de construction.

Mots clés : optimisation multiobjectif, OEP, bâtiments bois multiétages, confort, efficacité énergétique, métamodèle, analyse de sensibilité, écoconception.

Development of a multiobjective optimisation method for timber building : consideration of user comfort, environmental impact and structural safety

Abstract : Industrialised countries are seeking to reduce their energy consumption and to use alternative raw materials, including renewables such as wood. To promote its use, multi-storey timber constructive systems need the development of new design methods.

Building required a multicriteria design where conflicting objectives must be optimised simultaneously. Research solutions have to achieve the best Pareto-compromise between use performance and environmental impact of the building. This work aims to develop a multiobjective optimisation method of timber multi-storey building.

The objectives of maximising floor vibration comfort and minimising heating needs, thermal discomfort, global warming potential and embodied energy are taken into account. A multi-objective particle swarm optimization algorithm is used to obtain a set of non-dominated solutions which is the Pareto front. The solution space is constrained by regulatory requirements necessary for the safety of the structure. All objective-functions are modelled as analytic functions. Dynamic thermal simulation model outputs are replaced by metamodels.

The developed method is implemented on a case study. The results offer a great diversity in a panel of 20 000 optimal solutions. These results provide a basis for discussion between the different actors of a construction project.

Keywords : multiobjective optimisation, PSO, multi-storey timber buildings, comfort, energy efficiency, metamodeling, sensitive analysis, ecodesign.

Environnement dans lequel la thèse a été préparée

L'institut d'accueil de la thèse a été l'I2M, Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) au sein des départements TREFLE (Fluides et Transferts) et GCE (Génie Civil et Environnement).



Unité de recherche

Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, 33400 Talence, France.
CNRS, I2M, UMR 5295, 33400 Talence, France.
Arts et Métiers ParisTech, I2M, UMR 5295, 33400

Site : Université Bordeaux 1 A11-A11 BIS
351 cours de la Libération
33405 TALENCE Cedex

<http://i2m.u-bordeaux.fr/>

Ces travaux de thèse ont reçu un financement CIFRE de la part de l'ANRT et ont été réalisés au sein de Nobatek. Ils s'intègrent dans le projet précompétitif amont BOIS5+ porté par INEF4.

NOBATEK est un centre de ressources technologiques qui développe ses activités de recherche appliquée et ses prestations de service dans les domaines de l'aménagement et de la construction durables.

INEF4 est un Institut pour la Transition Énergétique qui a une activité collaborative mutualisée de recherche appliquée et d'innovation pour le secteur de la réhabilitation et la construction durables. Nobatek en est l'opérateur.



Centre de ressource technologique

Nobatek
67 rue de Mirambeau
64100 anglet



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

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

Remerciements

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance envers mes encadrants de thèse, Amadou Ndiaye, Alain Sempey, Philippe Galimard et Philippe Lagièrre, pour leur implication complémentaire, pour tous nos échanges fructueux et agréables, et pour leurs soutiens et enthousiasmes permanents. Je vous remercie pour votre rigueur et votre intégrité qui m'ont permis d'avancer tout au long de ce travail de thèse. Je tiens à remercier mon directeur de thèse Frédéric Bos de m'avoir accompagné durant ces trois années ainsi que pour la confiance et la liberté qu'il m'a accordées dans les prises de décisions et le choix des orientations nécessaires à ces travaux de thèse.

Je remercie chaleureusement M. Pierre Blanchet, Professeur à l'Université Laval et M. Christian Inard, Professeur à l'Université La Rochelle, pour avoir accepté d'être rapporteurs, pour leur investissement dans l'évaluation de mon mémoire et pour m'avoir permis de défendre ma thèse oralement. Je remercie également M. Abdel Hamid Bouchair, Professeur à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand pour avoir présidé le jury de ma thèse ainsi que Mme Bérangère Lartigue, Maître de Conférences HDR à l'Université Paul Sabatier de Toulouse pour y avoir participé. Leurs contributions, critiques et suggestions constructives ont permis d'alimenter la soutenance et d'ouvrir de nouvelles perspectives.

Je remercie particulièrement Marie Pauly, chef de projet à Nobatek, pour ses multiples conseils, sa franchise, son dynamisme et ses encouragements tout au long de ce travail de thèse. Merci également à Thomas Garnesson, ingénieur à Nobatek, pour sa disponibilité, sa gentillesse et son apport précieux dans ce travail. Merci à Baptiste Durand-Estebe, ingénieur de recherche à Nobatek, pour avoir partagé sa vision et réflexion et pour l'aide qu'il m'a apportée dans les développements informatiques.

Je remercie Jacques Tortos, Jérôme Lopez, et Philippe Lagièrre pour leur accueil au sein de Nobatek et de m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette thèse. Je remercie également Denys Breyse et Jean-Christophe Batsale de m'avoir ouvert les portes de leur département respectif au sein de l'I2M.

J'adresse aussi mes remerciements à de nombreuses personnes avec qui j'ai pris plaisir à échanger sur ce travail de recherche : Christophe et son logiciel TED, Rania et ses métamodèles, Boris et sa passion pour l'informatique, Maxime maître de l'ACV, Théo et sa rigueur, Antoine et sa vision, Fabien et ses MCP, Franck et sa passion multicritère et René et ses essences de bois spectaculaires.

Un très grand merci à tous les membres de Nobatek et d'I2M GCE et TREFLE d'hier et d'aujourd'hui, stagiaires, thésards et salariés, pour leur soutien, leur sympathie et l'ambiance de travail dynamique à laquelle ils contribuent tous. Des remerciements particuliers à Saed et sa philosophie, Jérémie, Paul, Jérôme Lu et Baptiste pour les « tea times », Pauline, Isabelle, Coralie et David pour vos coups de main, Aurélien et Antoine pour les minutes distractives, Jérôme La pour tes bons plans, Marie et Charlotte pour les pauses sushi, Thomas pour ta présence, Audrey et Romain pour les discussions STD, Charles pour te faire plaisir, Seb pour ton excellente paella, Julie pour ta bonne humeur et Maria pour ton soutien.

Je remercie tous mes amis pour leur soutien souvent malgré la distance et pour leur compréhension face à mon indisponibilité dans cette dernière ligne droite. Merci Christophe et Laurence, Guillaume, Julien, Manu, Philippe et Fanny, Marie, Floriane et Cédric, Audrey et Simon, Alex, Rachel, Peter and Kenny, Olivier, Julie et Nico, tous les 86 et tous les Homards.

Je tiens également à remercier de tout cœur Mimi qui se reconnaîtra pour m'avoir permis de travailler en toute sérénité et pour exercer son métier avec amour et dynamisme.

Je remercie tous les membres de ma famille, Armand, Decker, Bruneau, Marchand et Fouillen pour leur soutien et leur amour. Je remercie particulièrement mes grands-parents pour votre affection et pour tous ces bons moments passés ensemble. Merci également à Dominique pour ton soutien, ton aide et ta présence à ma soutenance. Merci à mes sœurs et mon frère pour votre amour et pour votre esprit familial. Merci à mes parents de m'avoir toujours soutenu malgré la distance qui nous sépare, c'est en partie grâce à vous que je suis ce que je suis aujourd'hui et j'en suis fier.

Mais surtout merci à toi Damien pour ton amour, pour le bonheur que tu m'apportes, pour savoir m'aider à prendre du recul aux moments les plus difficiles, pour réussir à me supporter et pour avoir pris soin de moi quand j'en avais besoin – pour ne pas dire tous les jours. Merci aussi de faire de notre famille une famille heureuse. Merci d'avoir partagé avec moi la joie de voir naître et grandir Tristan tant attendu. Merci à toi Tristan pour tous tes sourires, pour tous tes rires et pour savoir toi aussi me (ré)apprendre tant de choses si merveilleuses de la vie qu'on aurait tort de les oublier...

Table des matières

Remerciements.....	7
Index des figures.....	13
Index des tableaux.....	17
Nomenclatures et abréviations.....	18
Introduction générale.....	25
Chapitre I. Les bâtiments bois multiétages : vers de nouvelles méthodes et outils de conception.....	29
I.1. Problématique du bâtiment bois multiétage en France et à l'international.....	30
I.1.a La construction bois : une réponse durable à la densification urbaine.....	30
I.1.b Le secteur de la construction bois peine à émerger.....	33
I.1.c Identification des freins au développement de la construction bois.....	35
I.2. Faisabilité de la construction bois multiétage.....	41
I.2.a Un patrimoine architectural issu d'une histoire.....	41
I.2.b Des systèmes constructifs bois qui font leurs preuves.....	43
I.2.c La conquête de la hauteur, le défi actuel de la construction bois.....	47
I.3. Besoin d'outils et de méthodes de conception pour gagner en compétitivité.....	49
Chapitre II. Méthodes adoptées en conception multicritère de bâtiment.....	51
II.1. La conception multicritère d'un bâtiment : un problème d'optimisation multiobjectif.....	52
II.2. Formulation des problèmes d'optimisation multiobjectif dans le bâtiment.....	54
II.2.a Les objectifs.....	54
II.2.b Les variables de décisions.....	55
II.2.c Les contraintes.....	57
II.3. De l'optimisation à la décision et <i>vice-versa</i>	59
II.3.a La décision multicritère précède l'optimisation.....	59
II.3.b L'optimisation précède la décision multicritère.....	60
II.3.c La prise de décision s'effectue durant l'optimisation.....	64
II.4. Méthodes d'optimisation multiobjectif utilisées en conception de bâtiments.....	64
II.4.a Méthodes d'optimisation exacte par énumération exhaustive.....	64
II.4.b Méthode d'optimisation aléatoire.....	65
II.4.c Méthodes d'optimisation approchées.....	66
II.4.d Extension à l'optimisation multiobjectif avec front de Pareto.....	70
II.5. Synthèse et méthodologie de conception adoptée.....	72
Chapitre III. Choix des objectifs pertinents et sélection des variables significatives.....	77

III.1.	Processus de conception d'un bâtiment.....	78
III.1.a	Le bâtiment, un système constructif complexe	78
III.1.b	Le processus de conception de bâtiment	79
III.2.	Critères de performances et exigences pour la conception du système constructif	82
III.2.a	Critères de confort des usagers	84
III.2.b	La sécurité de l'ouvrage	94
III.2.c	Les impacts environnementaux	96
III.3.	Description du cas d'étude	99
III.3.a	Géométrie et composition des parois.....	99
III.3.b	Climatologie de l'étude.....	102
III.3.c	Hypothèses relatives à la thermique du bâtiment.....	103
III.4.	Choix des objectifs pertinents pour l'optimisation d'un système constructif bois adapté au bâtiment multiétage	105
III.4.a	Choix des objectifs de confort de l'utilisateur	106
III.4.b	Choix des objectifs environnementaux du bâtiment	107
III.5.	Détermination des variables significatives et graphe d'influence.....	107
III.5.a	Variables de conception envisageables	107
III.5.b	Sélection des variables significatives	112
III.5.c	Graphe d'influence	129
Chapitre IV.	Explicitation des liens entre variables et objectifs et modélisation des fonctions-objectif	131
IV.1.	Fonction-objectif en lien avec le confort vibratoire des planchers.....	132
IV.2.	Fonctions-objectif en lien avec le confort thermique estival et les besoins de chauffage.....	134
IV.2.a	Utilisation de métamodèles pour la modélisation des fonctions-objectif	135
IV.2.b	Critères de choix du métamodèle.....	136
IV.2.c	Les métamodèles par polynômes du chaos (PC)	138
IV.2.d	Démarche adoptée pour la génération des métamodèles	143
IV.2.e	Construction des métamodèles nécessaires au cas d'étude	148
IV.3.	Fonction-objectif en lien avec le potentiel de réchauffement climatique et énergie grise	152
IV.4.	Descriptions des contraintes liées au dimensionnement de l'ouvrage.....	154
IV.4.a	Modules mécaniques des planchers intermédiaires.....	156
IV.4.b	Modules mécaniques des toitures.....	157
IV.4.c	Modules mécaniques des murs	157
IV.4.d	Contraintes et hypothèses considérées dans le cas d'étude	158

IV.5.	Conclusion sur la méthodologie d'optimisation multiobjectif développée	159
Chapitre V.	Mise en œuvre de la méthode d'optimisation multiobjectif	161
V.1.	Choix d'une méthode d'optimisation adaptée au problème	162
V.1.a	Caractéristiques du problème d'optimisation à traiter.....	162
V.1.b	Choix de la méthode d'optimisation	163
V.2.	Présentation de l'algorithme d'optimisation multiobjectif par essaim particulaire.....	166
V.2.a	Description de l'algorithme de base	166
V.2.b	Prise en compte des variables discrètes	168
V.2.c	Intégration de la recherche multiobjectif	169
V.2.d	Intégration des contraintes sur un ensemble de variables	170
V.2.e	Description des paramètres du MOPSO	173
V.3.	Optimisation du cas d'étude.....	174
V.3.a	Sensibilité du front de Pareto aux paramètres du MOPSO	174
V.3.b	Validation des métamodèles sur les solutions optimales	182
V.3.c	Analyse de la diversité des solutions obtenues.....	188
	Conclusions et perspectives.....	199
	Références.....	206
Annexe A	Recensement de bâtiments bois multiétages (cinq niveaux et plus) construits dans le monde de 2003 à 2014.....	221
Annexe B	Débits de renouvellement d'air mensuel par ventilation naturelle saisis pour chaque logement	225
Annexe C	Paramètres permettant une qualification du confort vibratoire des planchers bois.....	227
Annexe D	Critères et hypothèses de vérification des structures en situation normale et en incendie	231
Annexe E	Hypothèses considérées pour la détermination des charges de neige et de vent sur les toitures et les murs.....	246
Annexe F	Principe de fonctionnement de quelques métaheuristiques.....	253
Annexe G	Caractéristiques des matériaux et composants utilisés pour l'optimisation du cas d'étude	259

Index des figures

Figure 1 : Courbe représentative de la diminution des consommations de carburant liées au transport selon la densification urbaine (Héran 2001)	30
Figure 2 : Mises en chantier de logements neufs en habitat collectif ou individuel d'après INSEE (INSEE 2010).....	31
Figure 3 : Montage et vue Sud-Est de la maison Napevomo au Solar Decathlon 2010, Espagne.....	33
Figure 4 : Evolution du marché des constructions bois dans le secteur de la maison individuelle de 2000 à 2012 (Fleury and Chiche 2004; Michel and Toppan 2012; PIPAME and ALCIMED 2012; Denormandie and Charmasson 2013).	34
Figure 5 : Part de marché de la construction bois dans les secteurs résidentiels et non résidentiels en 2011 et 2012 (Michel and Toppan 2012; Denormandie and Charmasson 2013)	34
Figure 6 : Part de marché de la construction bois dans les secteurs résidentiels dans le monde (Jaakko Pöyry Consulting 2004).....	35
Figure 7 : Bâtiments bois multiétages ancestraux.....	42
Figure 8 : Bâtiments multiétages à colombage à bois long et court.....	43
Figure 9 : Bâtiments multiétages à ossature bois.....	44
Figure 10 : Bâtiments multiétages en poteaux-poutres bois.....	45
Figure 11 : Immeubles bois en panneaux de bois lamellé croisé (CLT)	47
Figure 12 : Systèmes constructifs pour la grande hauteur	48
Figure 13 : Systèmes constructifs pour la grande hauteur testés sur des projets concrets	48
Figure 14 : Illustration de la conception multidisciplinaire et multicritère du bâtiment	52
Figure 15 : Évolution du nombre de publications dans le domaine de l'optimisation multiobjectif de bâtiments répertoriés dans la base bibliographique internationale Scopus	54
Figure 16 : choix des fonctions-objectif à optimiser dans la construction durable (Evins 2013) à gauche (nombre de travaux étudiés sur 74) et le bâtiment zéro énergie (Attia et al. 2013) à droite (nombre d'experts interrogés sur 28).....	55
Figure 17 : Diagramme des différents types de variables (Eric Brunelle 2008)	56
Figure 18 : Illustration de la dominance au sens de Pareto. a) le point orange domine les points gris foncés et est dominé par les points verts. b) Les points verts sont non-dominés et forment le front de Pareto.	61
Figure 19 : Comparaison des résultats obtenus (précision et nombre de solutions) par la recherche itérative avec la recherche aléatoire réalisée sur une durée de 72h selon le nombre d'unités de calcul utilisé (Naboni et al. 2013)	65
Figure 20 : Fréquence d'utilisation des différents algorithmes d'optimisation sur plus de 200 travaux dans le domaine de l'optimisation du bâtiment d'après (Nguyen et al. 2014)	70
Figure 21 : Illustration représentant les fronts de Pareto obtenus par Antipova et al. (2014) pour chacun des impacts environnementaux considérés en optimisant le potentiel de réchauffement climatique sous contrainte économique variable	71
Figure 22 : Méthodologie de conception : une première phase d'optimisation multiobjectif suivi d'une phase de décision multicritère	74
Figure 23 : Décomposition d'une construction en six sous-ensembles constitutifs (Gobin 2003)	78
Figure 24 : Processus d'un projet de construction inspiré du décret n°93-1268	79
Figure 25 : Schéma du besoin primaire auquel doit répondre le système constructif	82
Figure 26 : Illustration du critère des degrés-heures appliqué à une zone de température opérative de confort ...	86
Figure 27 : Gamme de températures opératives acceptables pour des bâtiments naturellement ventilés	88
Figure 28 : Synoptique de la démarche « dimensionnement d'un élément bois » selon les Eurocodes.....	95
Figure 29 : Plan et coupe du bâtiment étudié	99
Figure 30 : Représentations 3D du bâtiment étudié	100
Figure 31 : Profil de température extérieure annuelle (Bordeaux).....	102
Figure 32 : Température extérieure, nombre d'heures cumulées	102
Figure 33 : Profils d'occupation des logements (pour deux occupants).....	103
Figure 34 : Profils des puissances dissipées par les appareils électroménagers et l'éclairage	104

Figure 35 : Illustration de la composition du plancher intermédiaire type « CLT »	108
Figure 36 : Illustration de la composition du plancher type « solives »	108
Figure 37 : Illustration du plancher type « béton »	109
Figure 38 : Illustration de la composition des murs type CLT (gauche) et type à ossature (droite)	110
Figure 39 : Illustration de la composition de la toiture à solives	111
Figure 40 : Illustration de la composition du plancher bas	111
Figure 41 : Illustration de la composition de la cloison interne	111
Figure 42 : Plateforme logicielle de simulation thermique dynamique composée d'EnergyPlus, Trimble Sketchup et OpenStudio	113
Figure 43 : Classement des méthodes d'analyse de sensibilité (d'après looss 2011)	119
Figure 44 : Résultats de la méthode Morris (r=30 avec 6 niveaux) : besoins de chauffage (gauche) et degrés-heure d'inconfort estival (droite)	121
Figure 45 : Distance euclidienne normalisée des paramètres permettant de hiérarchiser leur influence sur les besoins de chauffage et les degrés-heures d'inconfort	122
Figure 46 : Indices de Sobol de premier ordre (Sobol1) et d'ordre total (SobolT) obtenus pour les besoins de chauffage	124
Figure 47 : Indices de Sobol de premier ordre (Sobol1) et d'ordre total (SobolT) obtenus pour les degrés-heure d'inconfort estival	125
Figure 48 : Confrontation du classement des paramètres par les indices de Sobol d'ordre total (SobolT) au classement de Morris pour les besoins de chauffage	125
Figure 49 : Confrontation du classement des paramètres par les indices de Sobol d'ordre total (SobolT) au classement de Morris pour les degrés-heures d'inconfort	126
Figure 50 : Graphe d'influence représentant les liens entre variables et objectifs	129
Figure 51 : Domaines de valeurs de la souplesse permettant de caractériser le confort vibratoire d'un plancher à solives. D'après Bocquet (2009)	132
Figure 52 : Niveaux de confort vibratoire déterminés selon la souplesse du plancher	133
Figure 53 : Étapes de la démarche adoptée pour la génération des métamodèles	143
Figure 54 : Echantillon d'un fichier « .idf » correspondant au cas d'étude dans lequel les valeurs numériques de deux variables ont été remplacées par des chaînes de caractères	144
Figure 55 : Organigramme de création du métamodèle	146
Figure 56 : Convergence des indices de Sobol de premier ordre et d'ordre total maximum calculés à partir des métamodèles correspondant aux degrés-heure d'inconfort estival (gauche) et aux besoins de chauffage (droite) en tenant compte respectivement de 18 et 20 variables	148
Figure 57 : Évolution de l'erreur RMSE et de l'ordre du métamodèle des besoins de chauffage (7 variables) selon la taille de l'échantillon	149
Figure 58 : Évolution de l'erreur MAE et de l'ordre du métamodèle des besoins de chauffage (7 variables) selon la taille de l'échantillon	149
Figure 59 : Évolution de l'erreur RMSE et de l'ordre du métamodèle des degrés-heure d'inconfort estival (8 variables) selon la taille de l'échantillon	149
Figure 60 : Évolution de l'erreur MAE et de l'ordre du métamodèle des degrés-heure d'inconfort estival (8 variables) selon la taille de l'échantillon	150
Figure 61 : Évolution de l'erreur RMSE des métamodèles des besoins de chauffage avec 7 et 20 variables selon la taille de l'échantillon	150
Figure 62 : Évolution de l'erreur MAE des métamodèles des besoins de chauffage avec 7 et 20 variables selon la taille de l'échantillon	151
Figure 63 : Évolution de l'erreur RMSE des métamodèles des degrés-heure d'inconfort estival avec 7 et 20 variables selon la taille de l'échantillon	151
Figure 64 : Évolution de l'erreur MAE des métamodèles des besoins de chauffage avec 7 et 20 variables selon la taille de l'échantillon	151
Figure 65 : Décomposition de l'énergie primaire en énergie matière et énergie procédé renouvelable ou non renouvelable	152
Figure 66 : Données environnementales concernant les indicateurs énergétiques du bois de structure en pin maritime massif provenant de la FDES n° 08-248 :2011	153
Figure 67 : Décomposition du système constructif en sous-systèmes porteurs et non porteurs	154
Figure 68 : Modules de vérification des contraintes mécaniques	155

Figure 69 : Logigramme correspondant à la méthode d'optimisation multiobjectif développée	160
Figure 70: Mécanismes de communication entre chaque particule d'un essaim faisant intervenir les relations entre la mémoire des particules et leur position, d'après (Clerc 2014)	166
Figure 71 : Principe de déplacement d'une particule selon l'algorithme d'optimisation particulière	168
Figure 72 : Illustration de l'évolution d'une archive A au cours d'une itération	170
Figure 73 : Illustration de l'ensemble des particules de l'archive qui domine la particule i et susceptible de prendre la position de gbest.....	170
Figure 74 : Évolution du nombre de solutions en fonction du nombre d'itérations pour des essais constitués de 10, 50, 100 et 500 particules.....	175
Figure 75 : Évolution du nombre de solutions en fonction du nombre de points de l'espace des solutions visité pour des essais constitués de 10, 50, 100 et 500 particules	175
Figure 76 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux avec l'inconfort en abscisse et les autres fonctions-objectif en ordonné pour 1000 itérations et pour 10, 50, 100 et 500 particules	177
Figure 77 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux avec l'inconfort en abscisse et les autres fonctions-objectif en ordonné pour 500 particules et pour 10, 100, 500 et 1000 itérations	178
Figure 78 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux avec l'inconfort en abscisse et les autres fonctions-objectif en ordonné pour 10 particules et pour 10, 100, 500 et 1000 itérations	179
Figure 79 : Évolution du nombre de solutions en fonction du nombre d'itérations pour des essais constitués de 10 particules avec des paramètres de constriction $\varphi=(4,0 ; 4,05 ; 4,1 ; 4,2)$	180
Figure 80 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux avec l'inconfort en abscisse et les autres fonctions-objectif en ordonné pour 10 particules, 1000 itérations et pour $\varphi=(4,0 ; 4,05 ; 4,1 ; 4,2)$	181
Figure 81 : Comparaison des résultats obtenus avec les métamodèles et le modèle numérique EnergyPlus pour les besoins de chauffage (gauche) et les degrés-heure d'inconfort (droite)	182
Figure 82 : Distinction des types de planchers pour la comparaison des résultats du métamodèle des besoins de chauffage avec EnergyPlus.....	183
Figure 83 : Comparaison des résultats obtenus avec les nouveaux métamodèles (12 variables) et le modèle numérique EnergyPlus pour les besoins de chauffage (gauche) et les degrés-heure d'inconfort (droite).....	185
Figure 84 : Évolution de l'erreur RMSE et de l'ordre du métamodèle des besoins de chauffage (12 variables) selon la taille de l'échantillon de construction	186
Figure 85 : Évolution de l'erreur MAE et de l'ordre du métamodèle des besoins de chauffage (12 variables) selon la taille de l'échantillon de construction	186
Figure 86 : Évolution de l'erreur RMSE et de l'ordre du métamodèle des degrés-heures d'inconfort (12 variables) selon la taille de l'échantillon de construction	187
Figure 87 : Évolution de l'erreur MAE et de l'ordre du métamodèle des degrés-heures d'inconfort (12 variables) selon la taille de l'échantillon de construction	187
Figure 88 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux en fonction du type de plancher intermédiaire	189
Figure 89 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux en fonction du type de mur extérieur	190
Figure 90 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux en fonction du type de vitrage Sud	191
Figure 91 : Graphe parallélisé représentant les 14 123 solutions obtenues et le cas de référence.....	193
Figure 92 : Graphe parallélisé représentant le cas de référence et les solutions qui le domine au regard de tous les objectifs.....	194
Figure 93 : Graphe parallélisé représentant les solutions avec mur à ossature bois avec une hauteur de montant inférieur à 14 cm.....	196
Figure 94 : Débits de renouvellement d'air mensuels horaires pour le logement situé en rez-de-chaussée.....	225
Figure 95 : Débits de renouvellement d'air mensuels horaires pour le logement situé au premier étage.....	226
Figure 96 : Débits de renouvellement d'air mensuels horaires pour le logement situé au deuxième étage.....	226
Figure 97 : Débits de renouvellement d'air mensuels horaires pour le logement situé au dernier étage.....	226
Figure 98 : Types de planchers dont un calcul de la souplesse est proposé par le Guide Eurocode sur la justification des planchers bois résidentiels (Bocquet 2009)	228

<i>Figure 99 : Courbe permettant de déterminer la valeur du paramètre b en fonction de la valeur de la souplesse d'un plancher à solives (AFNOR 2010a)</i>	230
<i>Figure 100 : Déformation d'un panneau CLT due au cisaillement roulant (FPInnovations 2011)</i>	232
<i>Figure 101 : Représentation d'une surface servant de base à la définition du moment statique, (Delaplace et al. 2008)</i>	235
<i>Figure 102 : Panneau CLT 5 plis et données permettant le calcul des moments statiques pour la vérification au cisaillement, (FPInnovations 2011)</i>	236
<i>Figure 103 : Illustration du principe de la recherche locale itérative</i>	253
<i>Figure 104 : Illustration du chemin le plus court entre la fourmière et la nourriture (Colorni et al. 1991)</i>	256

Index des tableaux

Tableau 1 : Paramètres du système constructif fixés et à étudier dans cette étude.....	81
Tableau 2 : Liste des performances du système constructif par fonction d'usage (d'après Gobin 2003)	83
Tableau 3 : Composition des parois opaques.....	100
Tableau 4 : Caractéristiques des ouvrants	101
Tableau 5 : Liste des objectifs choisis et développés dans cette approche.....	105
Tableau 6 : Description des variables relatives au plancher intermédiaire	109
Tableau 7 : Description des variables relatives aux murs extérieurs.....	110
Tableau 8 : Description des variables relatives aux planchers haut et bas.....	111
Tableau 9 : Description des variables relatives aux cloisons intermédiaires	112
Tableau 10 : Description des variables relatives aux fenêtres et aux protections solaires	112
Tableau 11 : Valeurs basses et valeurs hautes de la masse volumique et de la capacité thermique des isolants et des revêtements intérieurs.....	116
Tableau 12 : Variables d'entrées prises en compte pour l'analyse de sensibilité sur les besoins de chauffage et les degrés-heure d'inconfort estival du logement supérieur.....	117
Tableau 13 : Récapitulatif des variables significatives sélectionnées pour l'optimisation multiobjectif du système constructif du cas d'étude	128
Tableau 14 : Distribution de probabilité des variables et famille de polynômes orthogonaux associée (D.Xiu et al. 2002)	139
Tableau 15 : Paramètres de réglage des algorithmes d'optimisation à population de base suivant : algorithme génétique, optimisation par colonie de fourmis et optimisation par essai particulière	164
Tableau 16 : Erreur RMSE et MAE du métamodèle sur l'échantillon de validation (construction) et sur les solutions du front de Pareto (optimisation).	182
Tableau 17 : Erreur RMSE et MAE des nouveaux métamodèles sur l'échantillon de validation (construction) et sur les solutions du front de Pareto (optimisation).	184
Tableau 18 : Erreurs RMSE et MAE de métamodèles de besoins de chauffage (12 variables) construits avec un nombre d'évaluations variable.....	187
Tableau 19 : Erreurs RMSE et MAE de métamodèles des degrés-heures d'inconfort (12 variables) construits avec un nombre d'évaluations variable	188
Tableau 20 : Caractéristiques du cas de référence et des solutions sélectionnées	195
Tableau 21 : Performances du cas de référence et des solutions de références pour l'ensemble des objectifs considérés	196
Tableau 22 : Recensement de bâtiments bois multiétages (cinq à dix niveaux) construits dans le monde de 2003 à 2014.....	221
Tableau 23 : Valeurs des coefficients de pression extérieure pour une toiture-terrasse possédant des rives à arêtes vives (AFNOR 2010b).....	249
Tableau 24 : Valeurs des coefficients de pression extérieure pour les murs verticaux (AFNOR 2010b).....	252
Tableau 25 : Energie grise et potentiels de réchauffements climatiques issus de FDES et utilisés pour le cas d'étude	259
Tableau 26 : Caractéristiques thermiques des différents vitrages considérés pour l'optimisation du cas d'étude.....	260
Tableau 27 : Conductivité thermique des isolants considérés pour l'optimisation du cas d'étude	260

Nomenclatures et abréviations

Abréviations

NOTATION	SIGNIFICATION
ACO	<i>Ant Colony Optimisation</i>
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADIVbois	Association pour le développement des immeubles à vivre bois
APD	Avant-projet définitif
APS	Avant-projet sommaire
CLT	Bois lamellé croisé - <i>Cross Laminated Timber</i>
CNDB	Comité national pour le développement du bois
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CVC	Chauffage Ventilation Climatisation
ELS	Etats Limites de Service
ELU	Etats Limites Ultimes
ESQ	Esquisse
EXE	Exécution
FCBA	Institut technologique chargé des secteurs de la Forêt, de la Cellulose, du Bois-construction et de l'Ameublement
FFB	Fédération Française du Bâtiment
FLJ	Facteur de Lumière du Jour
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
HQE	Haute Qualité Environnementale
idf	<i>Input data file</i>
MADS	<i>Mesh Adaptive Direct Search</i>
MOP	Maîtrise d'Ouvrage Public
NSGA-II	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
OAT	One At a Time
OSB	Panneau de particules orientées - <i>Oriented Strand Board</i>
PRO	Etude de projet
PSO	<i>Particle Swarm Optimisation</i>
MOPSO	<i>Multi-Objective Particle Swarm Optimisation</i>
RDC	Rez-de-chaussée
R+n	N niveaux au-dessus du RDC
STD	Simulation Thermique Dynamique
SVM	Machine à Vecteurs de Support - <i>Support Vector Machine</i>

Symboles minuscules latins

NOTATION	SIGNIFICATION	UNITE
a	Souplesse du plancher	[mm/kN]
b	Paramètre directement lié à la valeur de la souplesse	-
c_1	Coefficient de confiance cognitive	-
c_2	Coefficient de confiance sociale	-
c_{dir}	Coefficient de direction	-
$c_o(z)$	Coefficient orographique	-

$c_r(z)$	Coefficient de rugosité	-
c_{season}	Coefficient de saison	-
d_j^*	Distance euclidienne entre l'origine et le point (μ_j^*, σ_j)	-
d_{LT}	Distance entre le centre géométrique de la section transversale de la couche longitudinale et le centre géométrique de la section transversale du panneau CLT	[mm]
$dx_j^{(i)}$	Effet élémentaire de la j -ème variable à la i -ème répétition	-
f	Fonction représentative d'une sortie du modèle numérique	-
f_{Hz}	Fréquence naturelle fondamentale du plancher	[Hz]
$f_{c,0,k}$	Valeur caractéristique de la résistance en compression axiale	[MPa]
$f_{c,90,k}$	Valeur caractéristique de la résistance en compression perpendiculaire	[MPa]
$f_{m,k}$	Valeur caractéristique de la résistance en flexion	[MPa]
$f_{v,k}$	Valeur caractéristique de la résistance en cisaillement	[MPa]
g	Fonction représentative d'une sortie du modèle numérique suivie d'une transformation isoprobabiliste \mathbf{T}	-
$gbest$	Meilleure position rencontrée par le voisinage d'une particule	-
g_j^t	Meilleure position locale jamais visitée par une des voisines de la j -ème particule	-
h	Approximation de la fonction g tronquée à l'ordre p	-
h_m	Hauteur des montants	[mm]
k	Nombre de valeurs d'une variable discrète	-
k_c	Facteur d'instabilité au flambement	-
$k_{c,90}$	Facteur qui tient compte de la configuration de chargement, de la possibilité de fendage et du degré de déformation en compression	-
k_{dis}	Coefficient pour la surface d'application d'une charge ponctuelle	-
k_{fi}	Coefficient qui permet de transformer une valeur caractéristique du fractile à 5% au fractile à 20%.	-
k_l	Coefficient de turbulence pour un terrain de catégorie de rugosité IV	-
$k_j^{(i)}$	Multi-indice composé des degrés des polynômes	-
k_{mod}	Facteur de modification	-
k_p	Paramètre lié au platelage d'un plancher	-
k_r	Facteur de terrain pour une catégorie de rugosité IV	-
k_s	Paramètre lié aux solives d'un plancher	-
l	Nombre de contraintes d'égalité du problème d'optimisation	-
m	Nombre de fonctions-objectif	-
n	Nombre de variables d'entrée	-
n_i	i -ème valeur d'une variable discrète	-
n_{40}	Nombre de modes du premier ordre avec des fréquences naturelles inférieures à 40 Hz	-
p	Ordre maximum de la série de polynômes constituant le métamodèle	-
$pbest$	Meilleure position rencontrée par une particule	-
$p_{i,j}^t$	Meilleure position jamais visitée par la particule i	-
p_{occ}	Période d'occupation	-

$q_p(z)$	pression dynamique de pointe à la hauteur z correspondant à la hauteur du bâtiment	[daN/m ²]
r	Nombre de répétition d'un plan OAT	-
r_1, r_2	Nombres aléatoires entre 0 et 1	-
s	Nombre de contraintes d'inégalité du problème d'optimisation	-
t	Durée	[s]
u	Facteur pour le calcul du facteur d'instabilité au flambement	-
v	Vitesse impulsionnelle du plancher	[m/s]
v_b	Vitesse de référence du vent à une hauteur de 10m	[m/s]
$v_{b,0}$	Valeur de base de la vitesse du vent de référence	[m/s]
$V_{i,j}^{t+1}$	Vitesse de la particule i à l'instant $t+1$	-
$V_m(z)$	Vitesse moyenne du vent à une hauteur z	[m/s]
w	Inertie d'une particule : coefficient de confiance « en soi »	-
x_i	i -ème variable de décision	-
$X_{i,j}^{t+1}$	Position de la i -ème particule à l'instant $t+1$	-
z	Hauteur du bâtiment	[m]

Symboles majuscules latins

NOTATION	SIGNIFICATION	UNITE
A	Archive contenant les particules meneuses (gbest)	-
\tilde{A}	Ensemble des coefficients du métamodèle approchés	-
A_T	Aire de la section transversale de la couche longitudinale	[mm ²]
B	Fonction correspondant à une distribution de Boltzmann	-
B_{bio}	Besoin bioclimatique	-
B_{ch}	Besoins de chauffage annuel surfacique	[kWh/(m ² .an)]
$B_{ch_{annuel}}$	Besoins de chauffage annuel	[J/an]
C_e	Coefficient d'exposition	-
C_{ep}	Consommation conventionnelle d'énergie primaire	[kWh _{EP} /(m ² .an)]
C_i	i -ème critère de dimensionnement	-
C_p	Chaleur spécifique	[J/kg.K]
C_{pe}	Coefficient de pression extérieure	-
C_{pi}	Coefficient de pression intérieure	-
C_t	Coefficient thermique	-
DH	Degrés-heures par an	[°C.h/an]
D_j^*	Distance euclidienne normalisée de la variable j	-
D_x	Rigidité composite en flexion des solives de plancher selon un axe perpendiculaire à l'axe des solives	[N.mm]
D_y	Rigidité composite en flexion des solives de plancher selon un axe parallèle à l'axe des solives	[N.mm]
D_{xy}	Rigidité composite du platelage multicouche et de l'inertie de torsion des solives	[N.mm]
E	Espérance	-

$(EI)_{eff}$	Rigidité effective d'un panneau CLT	[N.m]
$(EI)_{eff}^{1m}$	Rigidité effective d'un panneau CLT de 1m de largeur	[N.m]
$(EI)_b$	Rigidité du plancher selon un axe parallèle à la direction des solives	[N.m]
$(EI)_l$	Rigidité du plancher selon un axe perpendiculaire à la direction des solives	[N.m]
Eg_i	Energie grise du matériau i	[MJ/m ³] ou [MJ/m ²]
E_{mean}	Module d'élasticité longitudinal moyen	[MPa]
E_{nt}	Portée du platelage qui correspond à l'entraxe entre solives	[mm]
E_p	Epaisseur	[m]
$E_{0,05}$	Valeur à 5% du module d'élasticité parallèle au fil	[MPa]
\vec{F}	Vecteur composé de fonctions-objectif	-
$F_{max,k,05}$	Résistance caractéristique maximale d'un platelage à l'application d'une charge ponctuelle sur le plancher en partie courante ou au droit d'un joint de panneau	[MPa]
$F_{ser,k,05}$	Résistance caractéristique qui garantit que, jusqu'à l'atteinte de cette charge, aucun endommagement ou fissuration ne se produit sur le platelage en partie courante ou au droit d'un joint de panneau	[MPa]
F_q	q -ème fonction-objectif du problème d'optimisation	-
$F_{vibration}$	Fonction-objectif de minimisation du niveau d'inconfort vibratoire des planchers intermédiaires	-
F_{Bch}	Fonction de minimisation des besoins de chauffage	-
F_{DH}	Fonction-objectif de minimisation des degrés-heure d'inconfort	-
F_{eg}	Fonction-objectif de minimisation de l'énergie grise	-
F_{Prc}	Fonction-objectif de minimisation du potentiel de réchauffement climatique	-
G_i	i -ème contrainte d'inégalité du problème d'optimisation	-
H	Production de chaleur du corps	[W/m ²]
H_i	i -ème contrainte d'égalité du problème d'optimisation	-
IT	Nombre d'itération totale	-
$I_v(z)$	Intensité de la turbulence à une hauteur z	-
K_{ent}	Raideur apportée par le renforcement transversal d'un plancher	[daN/m]
L	Ecart entre la production de chaleur interne du corps et la perte de chaleur dans l'environnement	[W/m ²]
L_m	Longueur des montants	[mm]
L_{pl}	Largeur du plancher	[mm]
M	Masse surfacique du plancher	[kg/m ²]
M_f	Moment fléchissant agissant sur le panneau de plancher	[daN.m]
M_r	Masse surfacique du revêtement et de la chape du plancher	[kg/m ²]
M_s	Moment statique de la section transversale du panneau	[daN.m]
\mathcal{M}	Métamodèle	-
MAE	Erreur absolue maximale (<i>Maximal Absolute Error</i>)	-
N	Taille de l'échantillon de construction du métamodèle	-
N_{vib}	Niveau de confort vibratoire des planchers	-
P	Nombre de coefficient de la suite de polynôme constituant le métamodèle	-

PMV	Indice predicted mean vote	-	
$Portee_{pl}$	Portée du plancher	[mm]	
PPD	Indice Predicted Percentage of Dissatisfied	-	
PPDP	Critère PPD pondéré	-	
Prc_i	Potentiel de réchauffement climatique du matériau i	[CO ₂ equ/m ³] [CO ₂ equ/m ²]	ou
Q	Nombre de niveaux de discrétisation d'une variable	-	
Q_i	Quantité du matériau i	[m ³] ou [m ²]	
Q_k	Charge d'exploitation ponctuelle	[daN]	
R_{mean}	Rigidité moyenne du plancher sous charge ponctuelle en partie courante ou au droit d'un joint de panneau	[N.m]	
RMSE	Erreur quadratique moyenne (<i>Root Mean Square Error</i>)	-	
S	Charge de neige	[daN/m ²]	
Shab	Surface habitable	[m ²]	
S_i	Indice de Sobol du premier ordre de la i -ème variable	-	
S_{ij}	Indice de Sobol de second ordre de la i -ème variable en interaction avec la j -ème variable	-	
S_k	Valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol	[daN/m ²]	
S_{pl}	Surface du plancher intermédiaire	[mm ²]	
S_{T_i}	Indice de Sobol total de la i -ème variable	-	
S_w	Facteur solaire des ouvrants	-	
T	Température	[°C]	
T_{ed-i}	Température journalière extérieure du i -ème jour précédent	[°C]	
T_{rm}	Température moyenne glissante du jour	[°C]	
U	Fonction de pénalité	-	
U_p	Coefficient de déperdition thermique des parois	[W/(m ² .K)]	
U_w	Coefficient de déperdition thermique des ouvrants	[W/(m ² .K)]	
V	Variance totale	-	
V_i	Variance due uniquement à la i -ème variable	-	
V_{ij}	Variance due aux interactions entre la i -ème et la j -ème variable	-	
\vec{V}_i^t	Vecteur vitesse d'une particule	-	
V_{ois}	Voisinage	-	
V_t	Effort tranchant agissant sur le panneau de plancher	[daN]	
W	Fonction qui vaut 1 ou 0 selon le respect des contraintes	-	
W_d	Charge de vent ascendante qui exerce une dépression sur la toiture	[daN/m ²]	
W_p	Charge de vent descendante qui exerce une pression sur la toiture	[daN/m ²]	
W_v	Charge de vent	[daN/m ²]	
\vec{X}	Vecteur composé de variables d'entrée	-	
\vec{X}_i^t	Vecteur position d'une particule	-	
Y	Grandeur d'intérêt	-	
\tilde{Y}	Approximation de la grandeur d'intérêt Y	-	
\vec{Z}	Vecteur composé de variables d'entrée	-	

Symboles grecs

NOTATION	SIGNIFICATION	UNITE
α	Constante comprise entre 0 et 1	-
α_i	Coefficients de la réponse du modèle dans la base polynomiale	-
$\tilde{\alpha}_i$	Coefficients approchés du métamodèle	-
β_c	Facteur de rectitude	-
γ	facteur d'efficacité de raccordement	-
γ_M	coefficient partiel pour les propriétés d'un matériau	-
δ	Variation élémentaire	-
ζ	coefficient d'amortissement modal	-
λ	Conductivité thermique	[W/(m.K)]
λ_e	Rapport d'élanement	-
λ_{eff}	Rapport d'élanement efficace	-
μ	Nombre de particules ou d'individus	-
μ_j	Moyenne des effets de la j -ème variable	-
μ_j^*	Moyenne des valeurs absolues des effets	-
μ_n	Coefficient de forme pour la charge de neige	-
μ_z	Collection de distribution associée au vecteur \underline{Z}	-
μ_{zi}	Loi de distribution attribuée à la composante z_i du vecteur \underline{Z}	-
ρ_v	Masse volumique	[kg/m ³]
σ_c	Contrainte de compression	[MPa]
$\sigma_{c,90}$	Contrainte de compression perpendiculaire au fil	[MPa]
σ_j	Ecart type des effets	-
σ_m	contrainte de flexion	[MPa]
τ	Contrainte de cisaillement	[MPa]
φ	Paramètre de constriction	-
φ_i	Nombre aléatoire uniformément distribués entre 0 et 1	-
Γ	Transformation isoprobabiliste entre \underline{X} et \underline{Z}	-
$\phi_{k_j}^{(j)}$	Polynôme orthogonal associé à la $j^{ème}$ variable de degré k_j	-
ψ_k	k -ème vecteur de la base de polynômes à variables multiples	-
ψ_2	Facteur pour la valeur quasi permanente de l'action variable	-
Ω	Fonction de violation des contraintes	-

Indices et opérateurs

NOTATION	SIGNIFICATION
fi	En situation incendie
\lim	Limite
\max	Maximum
\min	Minimum

NOTATION	SIGNIFICATION
\circ	Opérative
\langle , \rangle	Produit scalaire
\circ	Loi de composition de fonctions

Introduction générale

La population mondiale ne cesse de croître. Aujourd'hui, elle comptabilise plus de 7 milliards d'habitants et devrait dépasser les 9 milliards d'ici à 2050 (United Nations 2015). Cette augmentation génère un réchauffement climatique planétaire résultant principalement d'émissions de gaz à effet de serre (GES). En 2013, la température moyenne de la planète était déjà supérieure de $0,63^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ par rapport à la moyenne des températures du XX^{ème} siècle (SOES 2015). Ce réchauffement est de l'ordre de $1,1^{\circ}\text{C}$ dans le Sud-Ouest de la France. D'après l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), le bâtiment est le secteur le plus consommateur d'énergie et producteur de 23% des émissions de GES en France (ADEME 2013). Il constitue ainsi un gisement en termes d'économies d'énergie. Conformément aux recommandations du GIEC¹, la France s'est donnée pour objectif de diviser par quatre ses émissions de GES d'ici 2050 (SOES 2015). Dans le domaine du bâtiment, cet objectif se traduit essentiellement par la réglementation thermique 2012 qui généralise à l'ensemble des nouvelles constructions la notion de Bâtiments Basse Consommation en visant une consommation en énergie primaire de $50 \text{ kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$ en moyenne (MEEDDM 2010).

Cette croissance démographique engendre aussi des besoins accrus de surfaces habitables et donc de matières premières, qui ne sont pas toujours abondantes. Un film documentaire alerte ainsi quant à la disparition du sable (Delestrac 2013) : le secteur de la construction est pointé du doigt. Deux tiers des constructions de la planète sont aujourd'hui réalisés en béton armé lui-même constitué de deux tiers de sable. Le sable dont la consommation augmente au fur et à mesure que la population et la taille des villes s'agrandissent, commence à se faire rare. Il devient alors crucial de trouver des alternatives au béton pour la construction.

Face aux pénuries de matières premières, de surfaces habitables et au vu des objectifs de préservation de l'environnement, les techniques constructives doivent évoluer. Ces dernières nécessitent des usages parcimonieux de matières premières non renouvelables. Les pays industrialisés cherchent alors à réduire la consommation d'énergie et à utiliser des matières premières de substitution, notamment renouvelables, dont le bois fait partie. L'utilisation du bois, matériau renouvelable et à faible potentiel de réchauffement climatique reste pourtant peu développée dans le bâtiment. Des freins d'ordre technique, culturel, économique et industriel rendent sa compétitivité difficile (PIPAME and ALCIMED 2012).

Alors que la fonction primaire d'un bâtiment est de protéger l'utilisateur des conditions climatiques extérieures et d'un environnement agressif, la conception d'un bâtiment est guidée par de nombreuses disciplines incluant l'énergétique, la mécanique des structures, l'environnement, l'éclairage et l'acoustique. Un bâtiment, et donc son système constructif, doit assurer à la fois un rôle de protection, de sécurité et de confort de l'utilisateur tout en limitant son impact environnemental. Il s'agit ainsi d'une conception multidisciplinaire faisant intervenir de multiples acteurs à divers moments d'un projet de construction. La conception d'un bâtiment

¹ Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade.

devient un problème complexe, puisqu'il nécessite de traiter simultanément plusieurs objectifs parfois contradictoires. Actuellement, dans la plupart des projets, chacune des disciplines est traitée indépendamment des autres. Les solutions technologiques sont alors améliorées par recherches itératives et peu d'alternatives sont finalement évaluées. Le manque de conceptions multidisciplinaires ne fait qu'accentuer les freins au développement de la construction bois multiétage. Le développement de méthodes et outils de préconception permettant le développement de systèmes constructifs bois compétitifs au regard de leurs performances d'usage et de leur impact environnemental, est nécessaire. Il s'agit de tenir compte de compromis entre des objectifs relatifs au confort des occupants et à l'impact environnemental du bâtiment. Ces méthodes doivent si possible inclure les exigences réglementaires dès le début d'un projet.

Dans cette optique, le projet précompétitif amont BOIS5+ porté par l'Institut pour la Transition Énergétique (INEF4) vise le développement d'une méthode d'optimisation multiobjectif de systèmes constructifs pour des bâtiments bois multiétage. Ce projet comporte deux axes :

- Le premier, consiste à développer une méthodologie d'optimisation multiobjectif et d'analyse multicritère d'aide à la conception de bâtiment bois multiétages. C'est dans cet axe que se positionne ce travail de thèse.
- Le second, consiste à définir une solution constructive bois multifonction optimisée en mécanique, thermique, acoustique, transferts hydriques et environnement.

Ainsi, cette thèse de doctorat se donne pour objectif de contribuer au développement de méthodologies et outils, permettant d'optimiser un bâtiment à faible impact environnemental en tenant compte du caractère multidisciplinaire et multiphysique de la construction en phase de conception.

Trois verrous scientifiques doivent ainsi être levés. Le premier consiste à développer une méthodologie multidisciplinaire et multiphysique où des objectifs de thermique, de mécanique et d'impact environnemental doivent être optimisés simultanément. Cette méthodologie doit également prendre en compte un très grand nombre de variables de conception de type hétérogènes. La prise en compte d'objectifs de thermique nécessite le recours à des outils de simulation thermique dynamique. Pour réduire les temps de calcul, l'emploi de modèles thermiques réduits doit être envisagé. Le troisième verrou consiste alors à rechercher la parcimonie des modèles thermiques employés en minimisant le nombre de paramètres d'entrée tout en maintenant une précision acceptable.

La finalité de ces travaux est le développement de méthodes et outils de conception multicritère de bâtiments permettant de générer une grande diversité d'alternatives à destination des équipes de maîtrise d'œuvre, en phase de conception.

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré au contexte de la construction bois multiétage. Les avantages, les limites et les freins à l'utilisation du bois dans des bâtiments multiétage sont listés. Un état de l'art des bâtiments bois multiétage est réalisé afin de démontrer la faisabilité technico-économique de ces constructions et de mettre en avant les leviers nécessaires à son développement.

Le second chapitre est un état de l'art des méthodes adoptées en conception multicritère de bâtiment. Les différentes méthodes d'optimisation multiobjectif sont définies et une synthèse décrivant la méthodologie adoptée est réalisée.

Le système constructif et un cas d'étude sur lequel la méthodologie développée est appliquée sont définis dans le troisième chapitre. S'appuyant sur un état de l'art des critères de performances utilisés dans la conception des bâtiments, les objectifs à optimiser sont ensuite choisis. Des analyses de sensibilité permettant d'identifier les variables significatives sont réalisées et les variables de conception sont sélectionnées.

Le quatrième chapitre est dédié à la modélisation de l'ensemble des fonctions-objectif choisies. Dans un premier temps les liens entre variables et objectifs sont explicités puis les fonctions-objectif sont modélisées. La modélisation des fonctions-objectif de thermique qui nécessite le recours à des modèles numériques détaillés passe par la construction de métamodèles.

Le dernier chapitre consiste à mettre en œuvre la méthodologie. Dans un premier temps, un algorithme d'optimisation existant est choisi au regard des spécificités du problème à optimiser. Cet algorithme est alors décrit puis utilisé pour optimiser le cas d'étude. La technique de construction de métamodèle est alors validée et les résultats sont analysés puis discutés.

Chapitre I. Les bâtiments bois multiétages : vers de nouvelles méthodes et outils de conception

Ce chapitre présente le contexte de la construction bois multiétage. Dans la première section, les principaux atouts du matériau bois dans la construction sont présentés et les freins à son développement, particulièrement dans le multiétage sont également listés. La seconde section constitue un état de l'art des bâtiments bois multiétages qui montre le potentiel et la faisabilité technique de tels ouvrages. Enfin, ce chapitre est conclu en proposant des leviers pour le développement de la construction bois multiétage.

I.1. Problématique du bâtiment bois multiétage en France et à l'international

I.1.a La construction bois : une réponse durable à la densification urbaine

La forte croissance de la population mondiale favorise le développement des zones urbaines dont la population devrait tripler d'ici 2030 (Loubens 2012). Pour éviter les conséquences néfastes d'un étalement urbain telles que la déforestation, la suppression de milieux naturels et l'augmentation des consommations de carburant liées au transport (Figure 1), la densification urbaine est à privilégier. L'une des conséquences de la densification urbaine est la construction de bâtiments multiétages.

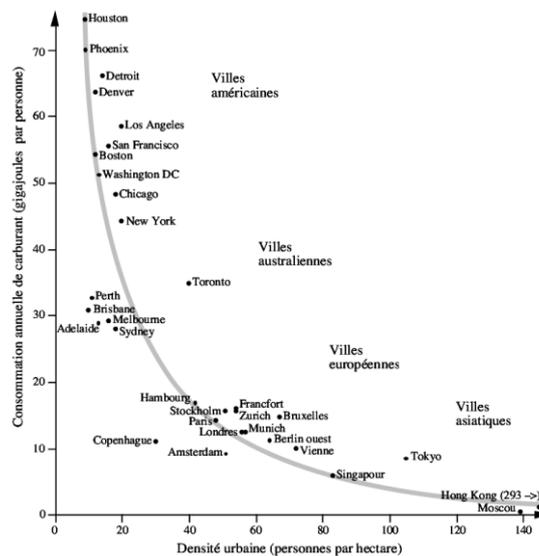


Figure 1 : Courbe représentative de la diminution des consommations de carburant liées au transport selon la densification urbaine (Héran 2001)

En France, malgré une diminution globale du marché de la construction neuve, la part des mises en chantier de logements collectifs a progressé ces dix dernières années et dépasse désormais celle des logements individuels (INSEE 2010) (Figure 2).

Cet accroissement démographique à l'échelle de la planète induit également une augmentation continue de la consommation de matières premières et d'énergies fossiles. Par conséquent, le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources non renouvelables s'accroissent considérablement (Sidler 2008). Cela a conduit, principalement depuis le sommet de Rio en 1992, à une prise de conscience des pays industrialisés qui cherchent à réduire la consommation d'énergie et à utiliser des matières premières de substitution, notamment renouvelables. Dans l'union européenne, le secteur du bâtiment représente à lui seul 42% des consommations d'énergie finale, 35% des émissions de CO₂ et 50% de l'extraction des matières premières (Commission Européenne 2011). Le développement de bâtiments multiétages durables, alliant efficacité et utilisation des ressources renouvelables, représente un défi majeur.

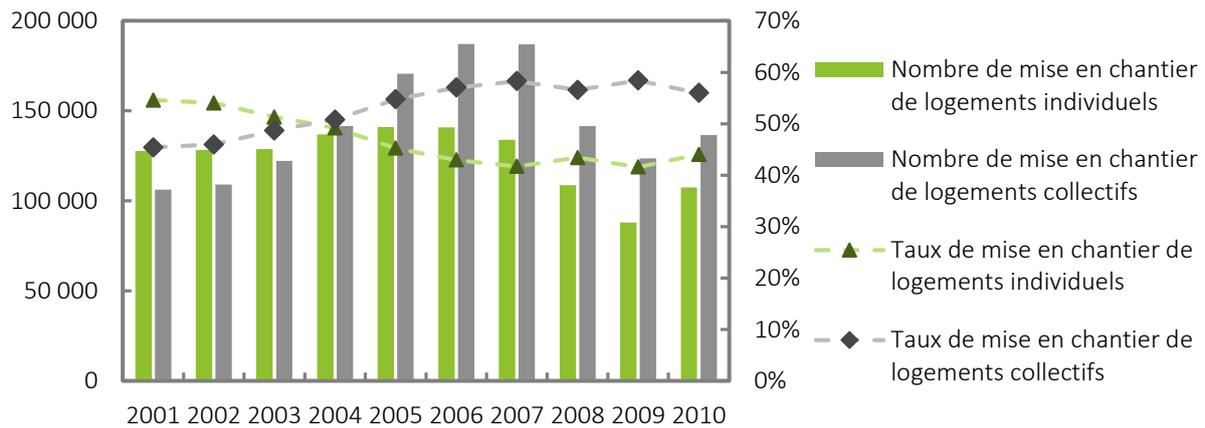


Figure 2 : Mises en chantier de logements neufs en habitat collectif ou individuel d'après INSEE (INSEE 2010)

Le matériau bois possède de nombreux atouts permettant de répondre à ces enjeux.

Tout d'abord, le bois est un matériau renouvelable dont la quantité ne cesse de croître en Europe où chaque année la forêt gagne 0,8 million d'hectares (United Nations 2011). En France, la surface forestière a augmenté de plus de 10% en moins de 25 ans (bois.com 2005).

C'est aussi un matériau capable de séquestrer du dioxyde de carbone grâce à la photosynthèse nécessaire à son élaboration. Les produits du bois ont alors un impact environnemental beaucoup plus favorable que des produits de fonction équivalente en réduisant les émissions de gaz à effet de serre dans la construction (Börjesson and Gustavsson 2000; Werner and Richter 2007; Dodoo et al. 2009; Buchanan et al. 2012; Fruehwald and Knauf 2014).

Une étude comparative réalisée sur un bâtiment bois multiétage suédois souligne l'importance du scénario de fin de vie sur les émissions de gaz à effet de serre. Dans le cas où le béton est criblé puis étalé pour accélérer sa carbonatation², le simple fait d'enfouir³ le bois ne suffira pas à lui donner l'avantage, il est alors nécessaire de recycler une part du bois ou de le valoriser⁴ sous forme d'énergie pour le rendre compétitif (Börjesson and Gustavsson 2000; Dodoo et al. 2009). Son potentiel de recyclage ou de valorisation énergétique est également un avantage certain du bois qui tend à avoir plusieurs usages dans son cycle de vie. C'est également un matériau de substitution aux énergies non renouvelables.

De plus, une étude comparative a montré que l'utilisation d'une structure béton plutôt que d'une structure bois augmenterait l'énergie primaire nécessaire à la production des matériaux de construction de 60 à 80% (Börjesson and Gustavsson 2000).

² La carbonatation est une réaction chimique dans laquelle la chaux (hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$) va absorber du dioxyde de carbone CO_2 ce qui engendre la formation de calcaire (carbonate de calcium CaCO_3) et d'eau. Cette réaction a lieu tout au long de la durée de vie du béton. Son rendement dépend de la surface de contact entre le béton et l'air. Elle est plus faible durant la mise en service du bâtiment et devient importante après sa démolition et le criblage du béton.

³ Lors de l'enfouissement du bois, sa décomposition émet du CO_2 mais également du méthane (CH_4) qui a un potentiel de réchauffement climatique beaucoup plus important que le CO_2 .

⁴ La valorisation énergétique du bois consiste à transformer directement la biomasse en énergie ou bien à récupérer le méthane issu de sa décomposition, qui renferme de 20 à 40% de l'énergie contenue initialement dans la biomasse solide.

L'un des avantages de l'utilisation en structure du bois par rapport aux matériaux de construction traditionnels est la réduction de la masse qui peut se traduire par la réalisation de fondations moins importante, moins coûteuse et sur des terrains moins exigeants. Par exemple, un bâtiment en bois de 100m² au sol et de 2 étages pèse 70 tonnes au lieu de 200 tonnes avec des matériaux traditionnels (Seve and Söderlind 2006).

Cette légèreté et sa provenance d'une filière sèche confèrent aussi au bois un potentiel de haut niveau de préfabrication, qui consiste à réaliser tout ou une partie de la construction en usine, avant le montage sur site. Or la préfabrication a de multiples atouts :

- **Organisation efficace des différentes phases du projet** : en mettant par exemple à profit le temps de préfabrication pour le terrassement ou la mise en place des fondations ; en intégrant durant la préfabrication les réseaux, les isolants et éventuellement les menuiseries et revêtements intérieurs ; en réduisant les déplacements, etc. L'ensemble de la réalisation du bâtiment peut ainsi être efficacement prévue et anticipée au moyen d'une maquette numérique du bâtiment (en anglais *Building Information Model*, BIM) qui constitue à la fois un processus de gestion et de production de données, un modèle unique du bâtiment et une plateforme logiciel.
- **Maîtrise de la qualité des ouvrages** : la préfabrication des éléments permet d'éviter de nombreux travaux et modifications non contrôlés sur chantier et de travailler en milieu protégé vis-à-vis des intempéries.
- **Rapidité de mise en œuvre** : la préfabrication des éléments et la mise en œuvre de macro-éléments réduisent considérablement le temps de chantier. Les risques climatiques sont donc plus limités et le coût financier du projet diminue par la réduction du temps d'immobilisation des capitaux.
- **Diminution des nuisances sur chantier** : en réduisant le bruit, les déchets et les interventions sur site.

Ces qualités ont notamment été démontrées lors des différentes éditions d'une compétition étudiante internationale, le Solar Decathlon⁵, visant à construire et mettre en service un prototype de maison à énergie positive en à peine 10 jours. De nombreux projets, comme la maison Napevomo (Figure 3) (Bruneau et al. 2010; Armand-Decker et al. 2011a), ont choisi le bois en tant que système constructif, d'une part pour ses avantages environnementaux et d'autre part pour ses facultés à être préfabriqué, transporté et mis en œuvre rapidement en conservant une finition de qualité (Irulegi et al. 2014; Pataky et al. 2014; Serra Soriano et al. 2014; Tonelli and Grimaudo 2014). Plusieurs niveaux de préfabrication des solutions bois ont alors pu être recensés au cours des trois éditions européennes du concours tels que des parois 2D à assembler et des modules 3D pré-équipés (Armand-Decker and Abadie 2015).

⁵ Créé en 2002 par le Département d'état américain de l'énergie solaire, le Solar Decathlon est une compétition universitaire internationale. Des universités et grandes écoles du monde entier sont réunies autour d'un défi, celui de concevoir et réaliser un habitat à l'échelle 1 fonctionnel et utilisant le soleil comme seule source d'énergie. <http://www.solardecathlon.gov/>

MAISON NAPEVOMO EN MONTAGE

Montage du mur Est
(©Julien Bodennec)



MAISON NAPEVOMO EN CONCOURS

Vue Sud-Est
(© Gonzalo Rodriguez)



Figure 3 : Montage et vue Sud-Est de la maison Napevomo au Solar Decathlon 2010, Espagne

Grâce à ces nombreux atouts, le matériau bois est particulièrement adapté à une densification urbaine durable. Les bâtiments bois multiétages apportent un élément de réponse originale et parfaitement adaptée à une stratégie urbaine visant à diminuer l'impact environnemental de la ville tout en répondant aux besoins de bâtiments d'une population qui ne cesse de se densifier.

C'est aussi le point de vue du gouvernement français qui a identifié la filière forêt bois comme « filière d'avenir ». En effet le **plan national d'action pour l'avenir des industries de transformation du bois** fait partie des 34 plans de reconquête industrielle de la Nouvelle France Industrielle présenté le 12 septembre 2013 puis représenté en 2015 sous forme de 9 solutions « Industrie du futur » en mai 2015. Ces plans portés par la filière Bois via la structure ADIVbois ambitionnent la réalisation de bâtiments de grande hauteur en bois avec comme objectif la construction de cinq à dix immeubles de taille moyenne (10 à 15 étages) d'ici 2017 (dont un sur Bordeaux) et la construction d'immeubles bois de plus de 15 étages d'ici 2030.

I.1.b Le secteur de la construction bois peine à émerger

En France, la part de marché de la construction bois dans le marché de la maison individuelle représentait près de 12% en 2012 (Denormandie and Charmasson 2013) contre 3,2% en 2000 (Fleury and Chiche 2004). C'est un secteur émergeant qui accroît ses parts de marché, en dépit d'une diminution globale d'activité de la construction (Figure 4).

Signé en mars 2001, l'accord-cadre Bois Construction Environnement prévoyait une augmentation progressive du bois dans la construction. Ce plan visait à augmenter la part du bois dans la construction en passant de 10% à 12,5% d'ici 2010, puis à 20% en 2020. Malgré la dynamique observée de ces dix dernières années le taux d'incorporation du bois dans la construction stagne aujourd'hui encore autour de 10% en France contre 15% en Allemagne et 35% en Scandinavie et en Amérique du Nord où 90% des maisons individuelles sont construites en bois (PIPAME and ALCIMED 2012).

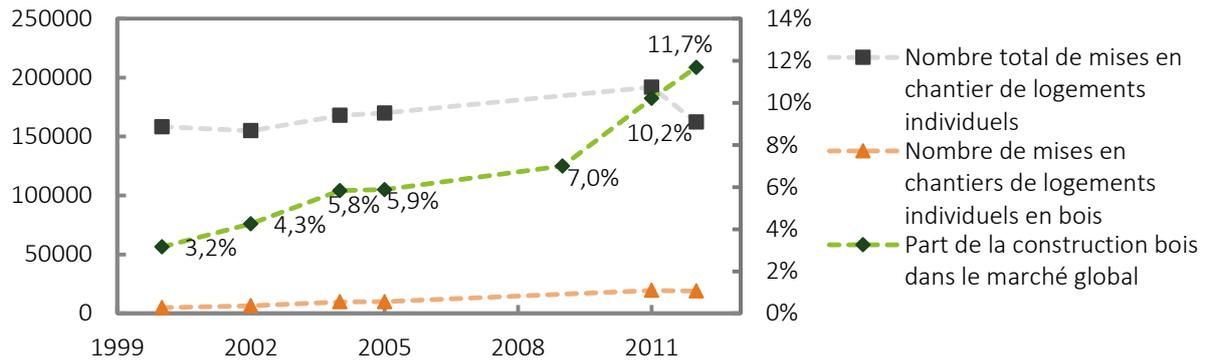
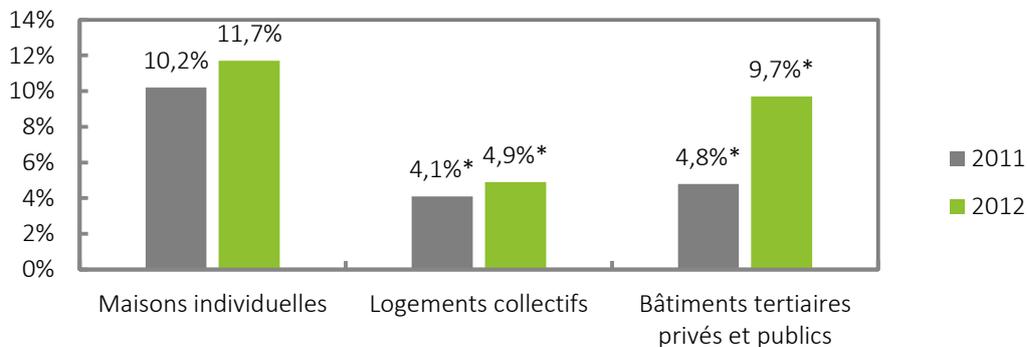


Figure 4 : Evolution du marché des constructions bois dans le secteur de la maison individuelle de 2000 à 2012 (Fleury and Chiche 2004; Michel and Toppan 2012; PIPAME and ALCIMED 2012; Denormandie and Charmasson 2013).

De même, dans les marchés du logement collectif et du bâtiment tertiaire, la part de la construction bois augmente, mais reste encore faible avec un taux de construction bois en 2012 de 9,7% pour le tertiaire et de 4,9% pour le logement collectif (Figure 5).



* Ces chiffres intègrent une part de structure mixte bois-béton

Figure 5 : Part de marché de la construction bois dans les secteurs résidentiels et non résidentiels en 2011 et 2012 (Michel and Toppan 2012; Denormandie and Charmasson 2013)

De manière générale, l'introduction du bois dans la construction peine sur le marché européen (Figure 6). Dans une étude sur la pénétration du marché de la construction bois multiétage dans l'Europe de l'ouest, Mahapatra & Gustavsson (2009) expliquent que la construction bois dans la plupart des pays européens est encore en phase émergente et que son faible taux d'utilisation en Europe résulte principalement de son histoire. Au XIX^e siècle, suite à de nombreux incendies ravageurs, les pays européens ont introduit des mesures de protection au feu qui ont longtemps découragé voire interdit l'usage du bois pour les constructions urbaines.

À l'échelle mondiale, l'utilisation du bois dans le bâtiment multiétage est également loin d'être répandue en regard des matériaux usuels concurrents. Paradoxalement au Québec, malgré une part de marché de la construction bois de plus de 90% dans le secteur du résidentiel, le bois disparaît comme élément structurel dès que le nombre d'étages est supérieur à 4 en raison des limites imposées par le code du bâtiment. Ce nombre peut être cependant porté à 6 avec dérogation. En contrepartie, une forte mobilisation en recherche et développement est actuellement engagée par les universités et les entreprises québécoises afin de lever les verrous scientifiques et industriels à l'utilisation du bois dans les bâtiments multiétages. Par

exemple, l'utilisation de panneaux de bois massif lamellé croisé a été mise en évidence dans le Manuel CLT (*Cross Laminated Timber*) (FPInnovations 2011) et un guide technique pour la conception et la construction de bâtiments en bois de grande hauteur au Canada a récemment été édité (FPInnovations 2014). Par ailleurs, des structures telles que la Chaire industrielle de recherche sur la construction écoresponsable en bois (CIRCERB) dirigée par Pierre Blanchet permettent de faire le lien entre la recherche et l'industrie du bois.

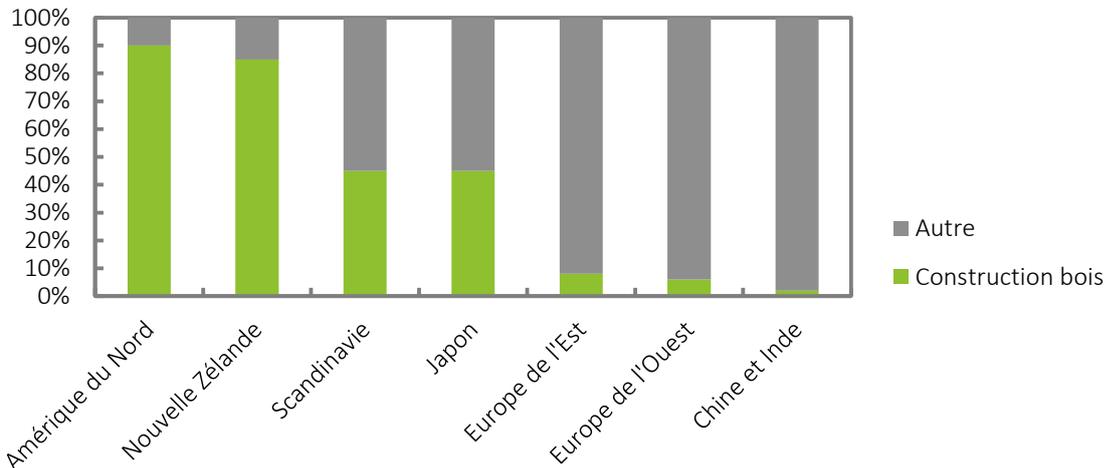


Figure 6 : Part de marché de la construction bois dans les secteurs résidentiels dans le monde (Jaakko Pöyry Consulting 2004)

En France comme à l'étranger, la densification urbaine pousse à la recherche de solutions durables permettant de répondre aux enjeux économiques et environnementaux. La construction bois multiétage est alors une alternative pertinente. Malgré ses nombreux atouts, elle peine à se développer en raison de multiples freins de nature différente.

I.1.c Identification des freins au développement de la construction bois

Bien que de plus en plus d'études et projets prouvent la faisabilité technique et économique de ces bâtiments (Minssart 2008; Valbois 2009; Lehmann 2012), le développement de la construction bois multiétage peine à se développer en France comme à l'étranger. De nombreuses études tentent alors d'en identifier les freins et proposent des moyens pour les lever (BRE 2004; Bayne and Taylor 2006; FCBA and CSTB 2009; Mahapatra and Gustavsson 2009; Hemström et al. 2011; CNDB 2012; Riala and Ilola 2014; Wang et al. 2014). Les freins à la construction bois sont de nature réglementaire, normative, technique, industrielle, économique, institutionnelle ou culturelle. La suite de cette section expose une liste de freins actuellement rencontrés en France.

Freins réglementaires et normatifs

Afin de stimuler l'usage du bois dans la construction, l'état a engagé en 2009 une réflexion visant à répertorier les obstacles réglementaires et normatifs à son développement et à proposer des actions pour lever les freins identifiés. Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) en partenariat avec l'institut technologique chargé des secteurs de la Forêt, de la Cellulose, du Bois-construction et de l'Ameublement (FCBA) ont été chargés de cette mission et ont rédigé conjointement un rapport sur cette thématique (FCBA and CSTB 2009).

L'application des normes européennes de vérification des structures (dites Eurocodes) fait partie des points identifiés par ce rapport. L'application des Eurocodes est rendue obligatoire par la législation française depuis le 1^{er} janvier 2014 pour les ouvrages soumis aux calculs parasismiques et le 14 mars 2014 pour les ouvrages soumis aux calculs de résistance au feu. Le calcul de la stabilité mécanique des ouvrages bois et de leur résistance au feu est traité par l'Eurocode 5 partie 1-1 et partie 1-2 (AFNOR 2005a; AFNOR 2008a). L'Eurocode 8 quant à lui aborde la résistance aux séismes des structures de bâtiments et apporte de nouvelles exigences de mises en œuvre et d'assemblage (AFNOR 2005b). L'évolution normative entraîne de nouvelles exigences que les solutions constructives doivent respecter. Certaines solutions traditionnelles ne sont plus reconnues avec les Eurocodes 5 et 8. Ces solutions doivent donc être à nouveau caractérisées et justifiées par le calcul ou par des essais mécaniques lorsque les méthodes de calculs définies dans les Eurocodes ne sont pas adaptées. Le manque de méthode de calcul dans les normes européennes est également un frein à la justification de nouveaux assemblages rendus possibles par les outils de taille à commande numérique. Par exemple, les assemblages par goujons collés ne sont pas référencés dans les normes européennes.

Concernant le confort vibratoire des planchers, les règles de vérification de la réponse en vibration des planchers bois sont basées sur un critère de fréquence fondamentale minimum de 8 Hz, ce qui est plus strict que pour les planchers acier et béton où elle est de 5 Hertz voire moins. Cette exigence pénalise fortement l'utilisation du bois en matériau porteur de planchers puisqu'un grand nombre de cas courants présentent une fréquence fondamentale comprise entre 5 et 8 Hz. Les planchers bois doivent bénéficier d'études lourdes pour alléger ces contraintes et assurer leur confort vibratoire.

Le classement mécanique des bois est également un frein au développement de la construction bois. La variabilité de la ressource d'origine biologique nécessite d'être adaptée à des contraintes industrielles en terme de qualité (dimensions, siccité, défauts, etc.) et de stabilité des flux. Cela impose de travailler avec des éléments reconstitués tels que le bois lamellé-collé. Une étape de transformation supplémentaire du matériau est alors à intégrer au processus industriel. Aussi, pour beaucoup d'essences de bois françaises les produits de seconde transformation ne sont pas classés et ne peuvent donc pas être caractérisés mécaniquement et intégrés dans le calcul des Eurocodes. C'est le cas de la plupart des feuillus qui représentent 71% de la superficie totale des forêts françaises (donc largement majoritaire par rapport aux résineux) et représentent 59% de la production biologique forestière annuelle (FCBA 2014). Développer l'utilisation massive du bois de feuillus pour des applications structurales aurait pour effet de diversifier la ressource de bois disponible pour la construction et dynamiserait l'utilisation du bois en structure.

D'autres freins réglementaires affectent l'utilisation du bois dans le bâtiment. La réaction au feu des produits à base de bois, matériau combustible, est un sujet délicat. Dans les locaux d'habitation, quelle que soit la famille⁶ de bâtiment concernée (hors immeubles de grande hauteur), il n'y a pas d'exigences en termes de réactions au feu. Cependant, pour certaines parties des ouvrages multiétages tels que les plafonds des halls d'entrée à partir de la 2^e famille, la réglementation impose l'utilisation de matériaux qui respectent une classe minimum de réaction au feu. Cette restriction freine l'utilisation de revêtements à base de bois puisqu'ils ne sont pas en mesure d'atteindre cette classe sauf s'ils sont traités ou si une caractérisation par essais démontre le contraire. Souvent, dans le cas d'établissements recevant du public (ERP) les revêtements doivent être incombustibles, ce qui n'est pas le cas d'un produit à base de bois. De plus, l'usage de façade bois peut être interdit pour certaines familles de bâtiments, car le niveau de réaction au feu atteint pour ce type de revêtement de façade n'est généralement pas suffisant. Au moment de la mise en place de la réglementation incendie en 1986, les caractéristiques de réaction au feu du bois étaient encore mal connues ce qui explique en partie cette restriction. Ces éléments constituent des freins à l'usage du bois en revêtement intérieur ou extérieur, mais n'affectent pas l'utilisation d'une structure bois dans un bâtiment multiétage qui n'est pas nécessairement revêtu de bois.

De même en ce qui concerne l'acoustique, au vu de la faible masse volumique du bois par rapport au béton, les systèmes constructifs bois requièrent des études particulières et peuvent représenter une faiblesse en matière de qualité acoustique. À cela s'ajoute un manque de données pour la caractérisation des solutions constructives bois ce qui ne favorise pas la préconisation de telles solutions en phase de conception. La caractérisation acoustique des parois est pour l'instant difficilement abordable par le calcul. De nombreuses mesures de calibration sont encore nécessaires. Afin de lever ce frein, le projet ACOUBOIS porté conjointement par le CSTB et le FCBA et l'association QUALITEL⁷ laisse entrevoir une simplification de la prescription de ces solutions. La caractérisation acoustique des solutions constructives bois faisant défaut, son but est entre autres d'élaborer des méthodes de prédiction des qualités acoustiques des parois et d'enrichir une base de données de solutions standards. Cette action rendra à terme plus simple la préconisation du recours au bois en phase conception.

La réglementation thermique 2012 en vigueur impose une étanchéité à l'air minimum qui implique une attention particulière de la part des différents corps d'état lors de la conception de la mise en œuvre des bâtiments à ossature bois. En effet ce système constructif est composé de multiples éléments de nature différente qui doivent être correctement jointés. Des formations associées à une mise en œuvre correcte sont alors nécessaires pour que les nouvelles constructions disposent d'une meilleure étanchéité.

⁶ La législation classe les bâtiments d'habitation et les logements-foyers en 4 familles. Lorsque le plancher bas du logement le plus haut est situé à plus de 50 m au-dessus du sol, le bâtiment relève des règles applicables aux immeubles de grande hauteur.

⁷ Association à but non lucratif indépendante ayant pour mission d'intérêt général l'information du grand public, l'évaluation, la promotion ainsi que la certification de la qualité de l'habitat en France et à l'étranger.
<http://www.qualite-logement.org/accueil.html>

D'une manière générale, l'évolution normative entraîne de nouvelles exigences (résistance au feu, sismique...) et des contraintes plus sévères (réglementation thermique 2012). Les solutions constructives doivent alors passer par de nouveaux filtres pour pouvoir être acceptées sur le marché. À cela s'ajoute une mauvaise connaissance des performances mécaniques et acoustiques des systèmes constructifs bois et des verrous liés à l'absence de méthode de vérification au sein des réglementations concernées. De plus les réglementations varient selon les pays européens. Une solution caractérisée et validée dans un pays ne sera donc pas toujours utilisable en France (Mahapatra and Gustavsson 2009), à moins qu'elle n'ait fait l'objet d'un Avis Technique Européen (ATE).

Une synthèse des freins réglementaires et normatifs identifiés est présentée ci-après :

LISTE DES FREINS REGLEMENTAIRES ET NORMATIFS IDENTIFIES

Freins liés au comportement mécanique des solutions constructives :

- *Obligation récente d'application des Eurocodes pour la résistance au feu et au séisme avec de nouvelles exigences mécaniques à respecter. Cela engendre un besoin accru en termes de développement méthodologique, de standardisation et de caractérisation des produits et solutions constructives bois.*
- *Règles de vérification du confort vibratoire des planchers bois plus strictes que pour les planchers acier et béton. L'utilisation du bois en matériau porteur de plancher est ainsi pénalisée.*
- *Etape de transformation du bois industrielle nécessaire pour l'obtention de produits bois moins hétérogènes en terme de qualité et de dimensions.*
- *Pour de nombreuses essences de bois françaises (bois feuillus) les produits de seconde transformation (bois d'ingénierie) manquent de caractérisation.*

Frein lié à la réaction au feu des solutions constructives :

- *Exigences de la réglementation incendie qui freinent l'usage de bois en revêtement de paroi, mais qui n'affectent pas l'utilisation d'une structure bois dans un bâtiment multiétage.*

Frein lié à la performance acoustique des solutions constructives :

- *Manque de solutions constructives bois validées qui engendre un manque de données important rendant leur prescription difficile en phase de conception. La caractérisation acoustique et le développement de systèmes constructifs bois standards sont freinés par un manque d'ingénierie.*

Frein lié à la performance thermique des solutions constructives :

- *Entrée en vigueur de la réglementation thermique 2012 qui induit une vigilance plus importante pour assurer l'étanchéité à l'air des systèmes constructifs qui multiplie le nombre d'éléments, tel que l'ossature bois.*
-

Freins techniques, industriels et économiques

Dans les systèmes constructifs bois, l'un des enjeux majeurs à traiter est le manque d'inertie thermique⁸ comparée à celui des systèmes constructifs conventionnels en béton. Ce manque d'inertie résulte de la faible masse volumique du matériau lui-même comparativement aux autres matériaux traditionnellement utilisés. Associées à un climat estival chaud, les constructions bois exigent une conception très soignée sous peine de générer surchauffes et inconfort thermique important. Pour pallier ce problème endémique, des méthodes de conception faisant intervenir le caractère dynamique du comportement d'un bâtiment bois doivent être mise en place pour permettre le développement de solutions efficaces (Sempey et al. 2009; Armand-Decker et al. 2011b; Armand-Decker et al. 2013). Ces solutions qui couplent souvent architecture bioclimatique, inertie thermique et sur-ventilation nocturne (naturelle ou mécanique) peuvent entraîner un surcoût ; elles nécessitent une bonne phase de conception et une utilisation correcte par les usagers de solutions souvent manuelles ou semi-automatiques (par exemple, le retour d'expérience sur le confort thermique estival des maisons passives du Taillan-Médoc (Armand-Decker and Lagièrre 2012)).

Un autre frein technique propre au matériau concerne sa durabilité dans le bâtiment. Le matériau bois est un matériau naturel, biodégradable et peut donc être soumis à des altérations induites par des attaques de champignons et d'insectes xylophages, généralement en présence d'humidité prolongée. Néanmoins, le respect de règles de construction (visant par exemple à éviter de placer le bois dans les conditions de classe d'emploi 4⁹) et l'emploi d'essences adaptées ou traitées suffisent à éliminer ces risques et à assurer la pérennité des ouvrages bois (Trouy-Triboulot 2012). Le CSTB et le FCBA estiment par exemple que le risque de dégradation par les termites est exacerbé par les mesures réglementaires (par exemple l'utilisation de barrières physico-chimiques ou physiques qui empêchent l'arrivée des termites souterrains par le sous-sol) prises dans les départements de métropole et constitue avant tout un frein psychologique à l'utilisation du bois dans la construction (FCBA and CSTB 2009).

Un inconvénient supplémentaire intrinsèque au matériau bois est son évolution au cours du temps. Les bâtiments bois multiétages sont alors soumis à des mouvements verticaux résultant du tassement, du retrait¹⁰ et de la déformation élastique du bois qui cumulés d'un étage à l'autre peuvent s'avérer non négligeables. En respectant certaines des règles de conception, en utilisant des bois sec et d'ingénierie et en favorisant la préfabrication ce phénomène reste modéré.

Enfin, l'industrie du bois française est très éclatée ce qui réduit sa compétitivité et son développement et pose des problèmes d'approvisionnement en matière première. Ce manque de concentration et d'homogénéité du secteur de la construction bois induit des difficultés pour la standardisation des composants et des systèmes constructifs et constitue un frein à la

⁸ L'inertie thermique d'une construction est sa capacité à stocker et à restituer des quantités importantes d'énergie dans la structure

⁹ La norme NF EN 335 sur la durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois définit cinq classes d'emploi. La classe 4 concerne les bois situés en extérieur en contact avec le sol et/ou l'eau douce. (AFNOR 2007c)

¹⁰ Le retrait du bois est le phénomène selon lequel les dimensions d'une pièce de bois varient avec son taux d'humidité.

maîtrise des coûts. Ainsi les maisons à ossatures bois ont un prix moyen encore 10% à 20% plus élevé que celui des constructions résidentielles en maçonnerie (PIPAME and ALCIMED 2012).

Une synthèse des freins techniques, industriels et économiques identifiés est présentée ci-après :

LISTE DES FREINS TECHNIQUES, INDUSTRIELS ET ECONOMIQUES IDENTIFIES

Frein lié à la faible masse volumique du matériau bois :

- *Faible masse volumique du bois qui limite l'inertie thermique du bâtiment et constitue un inconvénient majeur à l'obtention d'un confort thermique estival acceptable. Les bâtiments bois nécessitent une conception avancée et un bon usage pour assurer le maintien d'un confort thermique acceptable.*
- *Faible masse volumique qui induit la nécessité d'utiliser des solutions spécifiques pour répondre aux exigences réglementaires de confort acoustique.*

Frein lié à au caractère biodégradable du matériau bois :

- *Caractère biodégradable du matériau bois qui constitue un frein psychologique pour les différents acteurs de la construction et nécessite le respect de certaines règles de construction.*

Frein industriel et économique :

- *Offre actuelle de bâtiments bois multiétages très peu industrialisée et très éclatée. Cela induit un besoin de densification des réseaux entre l'industrie du bois et ceux de la construction. La faiblesse de l'outil industriel induit un prix moyen d'une construction bois plus élevé qu'une construction traditionnelle.*
-

Freins institutionnels et culturels

L'utilisation du bois dans la construction multiétage, n'est pas toujours bien perçue par les différents acteurs de la construction. Beaucoup de maîtres d'ouvrage appréhendent de construire avec le matériau bois et les bureaux de contrôle sont parfois réticents à valider les ouvrages en raison du manque d'informations concernant son comportement, notamment en cas d'incendie. Une étude suédoise s'est intéressée aux préférences des architectes suédois quant aux matériaux utilisés en structure des bâtiments de plusieurs étages (Hemström et al. 2011). Les résultats montrent que les architectes préfèrent l'utilisation du béton à celle du bois ou de l'acier pour la structure des bâtiments de 3 à 8 étages. Ils pensent généralement que les performances techniques du béton sont supérieures aux autres matériaux notamment vis-à-vis des critères de stabilité et de sécurité incendie. L'utilisation du bois pour de telles applications est perçue comme innovante et ne bénéficie pas aux yeux des acteurs de la construction d'un retour d'expérience égal à celui du béton ou de l'acier. Toutefois, quand il s'agit de considérer l'impact environnemental des matériaux, le bois est perçu comme le plus apte à répondre aux attentes correspondantes. Prouver les performances techniques notamment en matière de comportement au feu du bois en structure des bâtiments multiétages est nécessaire pour lever les craintes des concepteurs quant à son utilisation.

Le CNDB (comité national pour le développement du bois créé en 1989) propose de lever les freins culturels en améliorant l'offre de formation dans le domaine de la construction bois (CNDB 2012). Il paraît important de former architectes et ingénieurs à l'utilisation du bois en structure afin qu'ils soient à même de préconiser le recours à des systèmes constructifs faisant appel à ce matériau. Une communication efficace et la sensibilisation des différents acteurs de

la construction sont également présentées par le CNDB comme des moyens favorisant le développement de l'utilisation du bois. Accompagner les maîtres d'ouvrages par des missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage bois est aussi un moyen efficace de lever les freins culturels. Enfin, rassurer les bureaux de contrôle grâce aux résultats d'essais et avis techniques concernant des produits de la construction bois permettrait de lever certaines appréhensions sur l'utilisation de ce matériau en structure.

Une synthèse des freins institutionnels et culturels identifiés est présentée ci-après :

LISTE DES FREINS INSTITUTIONNELS ET CULTURELS IDENTIFIES

- *Manque de confiance dans l'utilisation du bois dans la construction multiétage principalement dû à un manque de connaissances, d'expériences issues des réalisations et donc de retour d'expérience.*
 - *Manque d'enseignement, de formation et de compétences dans le domaine de la construction bois.*
 - *Manque de références validées et reproductibles.*
 - *Manque de R&D sur plusieurs disciplines ainsi qu'en approche multidisciplinaire pour développer des solutions techniques adaptées aux bâtiments multiétages bois.*
-

En conclusion, en France, malgré l'absence d'obstacles réglementaires rédhibitoires, le développement de la construction bois multiétage est ralenti par un manque de formation, de connaissance et d'ingénierie, et également par des obstacles culturels et industriels qui rendent sa compétitivité difficile.

I.2. Faisabilité de la construction bois multiétage

De nombreuses réalisations, d'aujourd'hui et d'hier sont des preuves de la durabilité et de la faisabilité technique des bâtiments bois multiétages. Cette section présente un état de l'art de ces constructions bois multiétages qui ont traversé les siècles et qui se retrouvent partout dans le monde, soumises à diverses contraintes géographiques (sismiques, climatologiques, etc.).

I.2.a Un patrimoine architectural issu d'une histoire

Le bois est un matériau de construction ancestral et qui compose la structure de bâtiments historiques (Figure 7). Horyu-Ji, la plus ancienne pagode en bois a été construite au VII^e siècle à Nara, au Japon. Elle possède cinq étages et mesure 32,5 mètres de haut. Ce monument toujours sur pied, prouve que l'usage du bois dans la construction multiétage est non seulement pérenne sur plusieurs siècles, mais aussi que la stabilité mécanique de tels bâtiments est conçue pour résister aux séismes les plus intenses grâce à des techniques constructives particulières adaptées.

TEMPLE HORYU-JI, JAPON

Pagode à cinq étages

(©Tomo Yun, www.yunphoto.net)



STAVKIRKE DE HEDDAL, NORVEGE

Église en bois

(©[Micha L. Rieser](http://Micha.L.Rieser))



Figure 7 : Bâtiments bois multiétages ancestraux

En Europe, Stavekirke de Heddal est la plus haute église en bois de Norvège et a été édifée au XIII^e siècle. Ce bâtiment constitué de poteaux-poutres repose sur un parterre de pierre pour assurer la durabilité de l'ouvrage contre l'humidité du sol. C'est un autre exemple de pérennité des ouvrages bois qui a fait ses preuves à l'échelle de plusieurs siècles.

Jusqu'à la fin du Moyen-Âge, la technique du colombage à bois long a été largement utilisée (Figure 8). Elle consiste à utiliser des poteaux de bois verticaux de forte section qui ont une longueur correspondant à la hauteur du bâtiment (de fond en comble). Des pièces de bois de plus petites dimensions permettent de former une ossature s'appuyant sur les poteaux. Les vides que comporte cette ossature sont alors comblés par du torchis ou de la maçonnerie. Une autre technique de construction à bois long se retrouve dans les pays anglo-saxons, principalement aux États-Unis. Apparues au XIX^e siècle, les constructions dites *balloon frame* utilisent également des pièces de bois verticales qui courent sur toute la hauteur du bâtiment. Contrairement à la technique du colombage, ces pièces ont une section plus réduite, car sont disposées en maille plus fine.

L'inconvénient majeur de ces constructions à bois long est la limitation de leur hauteur imposée par la longueur des pièces de bois disponibles. C'est d'ailleurs la difficulté à s'approvisionner en éléments de ce type qui a entraîné à la fin du Moyen-Âge, le développement d'une technique employant des bois courts.

CENTRE DE RENNES, FRANCE

Colombage à bois long

(© Sokoljan)



CENTRE D'OCHSENFURT, ALLEMAGNE

Colombage à bois court

(© Matthieu Riegler, CC-BY)



Figure 8 : Bâtiments multiétages à colombage à bois long et court

C'est au cours des XV^e et XVI^e siècles qu'est apparue la première technique à bois court avec le colombage utilisant des pièces de bois verticales d'une longueur inférieure à la hauteur du bâtiment (Figure 8). L'utilisation de bois court dans la construction rend la mise en œuvre plus rapide et facilite la manœuvre des pièces de bois. Aux États-Unis, dans le *platform frame* la réalisation se fait par étage, chaque plateforme étant utilisée comme site de fabrication du nouvel étage.

Bien que ces techniques constructives aient démontré leur faisabilité technique et leur durabilité dans le temps, elles sont également caractérisées par un faible niveau de préfabrication. La phase de montage peut être longue, ce qui ne permet pas à ces systèmes d'être concurrentiels. Ces techniques constructives ne sont donc pas ou plus pertinentes dans le bâtiment multiétage pour des raisons de technique constructive et d'économie.

I.2.b Des systèmes constructifs bois qui font leurs preuves

Aujourd'hui, selon un recensement de trente-neuf bâtiments bois multiétages construits sur la période de 2003 à 2014 (Annexe A), les principaux systèmes de structure utilisés dans le bâtiment multiétage sont l'ossature bois, le système poteaux-poutres et le panneau de bois massif lamellé croisé. Ces systèmes permettent un bon niveau d'industrialisation et une mise en œuvre rapide.

Les bâtiments multiétages à ossature bois

L'ossature bois est un dérivé de la construction à colombage bois court et du *platform frame*. Comme pour la technique du colombage, la longueur des pièces de bois verticales est égale à la hauteur d'un étage. La disposition rapprochée de ces pièces de bois est identique à celle utilisée pour les techniques du *balloon* et *platform frame* et permet la mise en œuvre d'éléments de faible section. Une ossature est formée à partir des montants verticaux fixés sur une lisse basse et une lisse haute. Des panneaux dérivés du bois, généralement des panneaux à grandes particules orientées (*Oriented Strand Board OSB*), fixés sur les montants assurent le contreventement de la structure. La paroi est ensuite complétée de multiples éléments

permettant d'assurer les fonctions d'étanchéité à l'air, d'isolation thermique et d'isolation acoustique. En 2009 à Seattle (Washington), cinq étages en bois plus une mezzanine ont été construits sur une base de deux étages en béton (Figure 9). Le coût du bâtiment a été estimé 30% inférieur à celui d'un bâtiment similaire en béton (FPInnovations 2014). La conception avancée du bâtiment a permis de résoudre un certain nombre de freins techniques et réglementaires concernant la sécurité de l'ouvrage et le risque de tassement du bâtiment.

MARSELLE, ÉTAT DE WASHINGTON

Ossature bois

(© Woodworks, www.woodworks.org)



MARCEAU, FRANCE

Ossature bois

(© Graam architecture)



Figure 9 : Bâtiments multiétages à ossature bois

En France, à Montreuil-sous-Bois, un bâtiment mixte bois-béton de cinq étages sur rez-de-chaussée (R+5) à ossature bois a été érigé en 2011 avec un coût modéré¹¹ de 1470 €/m² hors taxes (Figure 9). Les circulations verticales en béton et les mitoyennetés avec deux autres bâtiments permettent d'assurer le contreventement de la structure. Bien qu'étant la technique constructive bois la plus répandue et certainement la moins coûteuse l'ossature bois n'est généralement utilisée que pour des bâtiments de quatre ou cinq niveaux maximum en raison de ses limites techniques¹².

Les bâtiments multiétages en poteaux-poutres de bois lamellé-collé

Le développement du bois lamellé-collé (Glued Laminated Timber GLT) au début du XX^e siècle permet l'obtention de pièces de bois de fortes sections et est utilisé dans la technique de

¹¹ Le Ministère de l'Égalité des territoires et du Logement a publié les valeurs de référence des coûts de la construction en Septembre 2013 et indique que le coût de référence moyen de la construction de logements étaient de 1501€/m² hors taxe en 2012. <http://www.territoires.gouv.fr/cout-de-la-construction>

¹² Dans l'ossature bois, les charges verticales augmentent proportionnellement au nombre d'étage et sont reprises par les lisses basses qui travaillent en compression perpendiculaire. Dans le bois, la contrainte admissible de compression perpendiculaire est très faible par rapport la contrainte admissible de compression axiale qui pour un bois massif résineux classé C24 sont respectivement de 2,5 N/mm² et 21 N/mm² (AFNOR 2008a).

construction en poteaux-poutres. Des portiques constitués de poteaux supportant une poutre transversale sont disposés suivant une trame généralement comprise entre 3 et 6 mètres, ils supportent les planchers et la toiture. Les charges sont ainsi transmises aux fondations par l'intermédiaire des poteaux. Le contreventement de ce type de structure est le plus souvent assuré par les portiques eux-mêmes lorsqu'ils sont stables dans leur plan. Des dispositifs du type « croix de Saint-André » placés entre poteaux assurent le contreventement dans le plan perpendiculaire aux portiques. Une enveloppe isolante, étanche à l'air et à l'eau vient alors recouvrir la structure bois.

TAMEDIA, SUISSE

Poteaux-poutres

(© Blumer-Lehmann AG)



MAISON DE L'INDE, FRANCE

Poteaux-poutres

(© Agence Lipsky – Rollet)



Figure 10 : Bâtiments multiétages en poteaux-poutres bois

Cette technique de construction permet de dégager de grands volumes et de bénéficier d'ouvertures importantes. Les bâtiments ainsi obtenus sont souvent de grandes dimensions et comportent plusieurs niveaux. C'est le cas du bâtiment tertiaire Tamédia à Zurich (Suisse) qui, entièrement en poteaux-poutres bois en lamellé collé, bénéficie d'une structure apparente à la fois aérée et esthétique (Figure 10). Le bâtiment est constitué de sept niveaux dont la continuité des piliers a été étudiée pour éviter un travail en compression perpendiculaire du bois. En France, une résidence étudiante de sept étages en poteaux-poutres en lamellé collé sur rez-de-chaussée béton (R+7) a été livrée en 2013 (Figure 10). Des modules en lamellé collé sont implantés autour d'un noyau central en béton qui intègre les circulations verticales et horizontales. Cela permet de contreventer le bâtiment et de répondre aux exigences réglementaires de sécurité incendie. La résistance au feu des parois bois est assurée par la superposition de deux plaques de plâtres (BA13) ce qui permet d'atteindre un coupe-feu d'une heure, comme pour les planchers. Le coût total a atteint 1520€/m² hors taxes.

Les bâtiments multiétages en panneaux de bois massif lamellé croisé

Développée au début des années 1990, l'utilisation de panneaux de bois massifs lamellés-croisés est la technique constructive la plus récente. Elle détient la palme de la plus grande hauteur du bâtiment bois moderne et est probablement la plus utilisée dans ce domaine. Aussi

appelés panneaux CLT (Cross Laminated Timber), ces panneaux sont réalisés à partir de lamelles de bois massif assemblées entre elles par collage. Les lamelles disposées dans la même direction forment un pli et la succession de plis orthogonalement orientés les uns par rapport aux autres forme les panneaux. Ils sont capables de reprendre des charges importantes ce qui les rend appropriés pour le bâtiment multiétage. Les panneaux reprennent à la fois les charges verticales et participent au contreventement de la structure. Le CLT est utilisé pour réaliser murs, planchers et toitures. À l'heure actuelle, en France, cette technique de construction ne relève pas encore du domaine traditionnel, elle ne figure pas dans les normes en vigueur. L'utilisation du CLT s'appuie donc sur les avis techniques obtenus par les différents fabricants de panneaux. Le centre de recherche canadien FPInnovations a conçu un guide pour le dimensionnement de ce type de structure. Le *Manuel CLT* (FPInnovations 2011) propose une méthode de dimensionnement des panneaux de bois lamellé croisé qui se base sur le principe de l'*Eurocode 5* et plus particulièrement sur ses annexes B et C qui traitent respectivement des poutres assemblées mécaniquement et des poteaux reconstitués (AFNOR 2008a).

Un des principaux avantages du CLT est la rapidité de construction des structures. Par exemple la structure de la tour de logements de neuf niveaux (R+8) Stadthaus, a été montée par une équipe de quatre charpentiers en 27 jours (Poggi 2014).

À Milan, en Italie, quatre bâtiments résidentiels de neuf niveaux (R+8) tous en bois ont été livrés en 2014 (Figure 11). La conception de la structure a été réalisée par étage et les épaisseurs des panneaux CLT 5 plis varient selon les niveaux avec une épaisseur de 120 mm pour le niveau 9 et de 200 mm au rez-de-chaussée. Des études techniques ont été réalisées pour répondre aux fortes contraintes de sismicité de la zone. En raison de la faible résistance à la compression perpendiculaire du bois, des vis et des clous ont été utilisés pour renforcer les panneaux au niveau des jonctions entre les panneaux verticaux et les planchers intermédiaires. Les charges ont également été réparties sur une quantité de parois plus importante pour les niveaux inférieurs. Les premières réalisations s'appuyant sur l'utilisation du CLT ont permis de prouver les performances techniques et la durabilité de ce produit. En France, à Saint-Dié-des-Vosges, une résidence HLM (habitation à loyer modéré) de huit niveaux (R+7) dont la structure est en CLT et l'isolation en paille a été livrée en 2014 (Figure 11). Cette opération labellisée PassivHaus est non seulement une référence de par sa hauteur, mais aussi de par ses performances thermiques et environnementales.

VIA CENNI, ITALIE

Panneau bois lamellé croisé
(© Rossiprodi Associati)



JULES FERRY, FRANCE

Panneau bois lamellé croisé
(© Antoine Pagnoux ASP ARCHITECTURE)



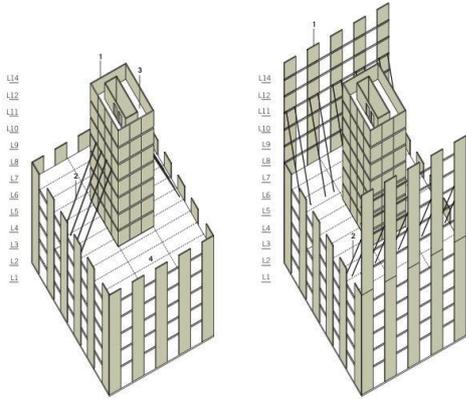
Figure 11 : Immeubles bois en panneaux de bois lamellé croisé (CLT)

Le CLT, apprécié pour son niveau de préfabrication élevé et sa rapidité de mise en œuvre, semble être amené à jouer un rôle important dans l'avenir de la construction bois multiétage. Cependant, les fabricants recommandent de limiter son utilisation à des bâtiments de 15 niveaux. Alors que la recherche de hauteur ne fait que croître, le besoin de développer de nouveaux procédés permettant de dépasser le R+14 apparaît aujourd'hui.

I.2.c La conquête de la hauteur, le défi actuel de la construction bois

D'autres projets plus ambitieux misent plutôt sur la mixité des matériaux afin d'atteindre des hauteurs importantes. Avec son concept FFTT (*Finding the Forest Throuh the Trees*) (Green 2012), l'architecte Michael Green propose de bâtir des ouvrages de structure mixte bois/acier pouvant atteindre 30 étages, dans des régions à risque sismique élevé. Il s'appuie sur l'utilisation d'un noyau central réalisé à partir de panneaux bois massifs autour duquel viennent prendre place des murs de refend latéral et des dalles de bois massif également. L'ajout de poutres en acier boulonnées aux panneaux bois massifs renforce l'ensemble de la structure en assurant une faible liaison qui apporte de la ductilité structurale (Figure 12). Les architectes Skidmore, Owings & Merrill ont un projet tout aussi ambitieux, intitulé CJFT (Concrete Jointed Timber Frame) (Skidmore Owings & Merrill LPP 2013). Ils imaginent la construction d'un bâtiment mixte de 42 étages constitué à 70% de bois et décrivent sa conception. Ils utilisent des poteaux, des poutres et des panneaux CLT. L'acier est utilisé en renforcement au niveau des liaisons poteaux-poutres et le béton, sous forme de poutres, est disposé le long des façades en périphérie du bâtiment ainsi qu'en éléments traversants (Figure 12).

CONCEPT FFTT (Green 2012)
Système mixte bois acier, 30 étages
(© Michael Green)



CONCEPT CJFT (Skidmore Owings & Merrill LPP 2013)
Système mixte bois/béton, 42 étages
(© SOM)

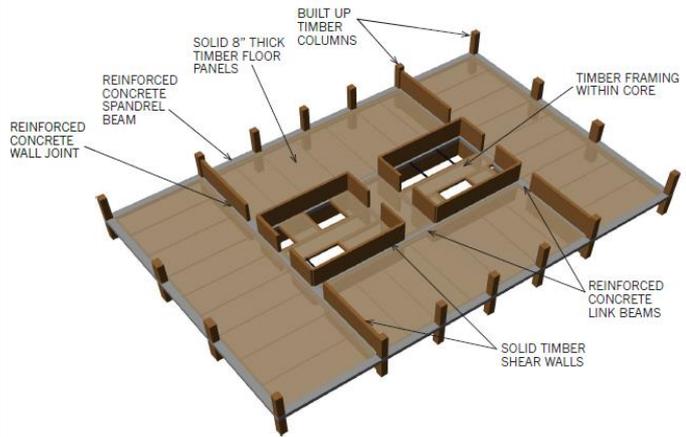


Figure 12 : Systèmes constructifs pour la grande hauteur

Dans une démarche identique de recherche de hauteur, la firme autrichienne CREE a développé un système constructif mixte bois-béton baptisé *Lifecycle Tower* qui lui permettrait de bâtir des ouvrages jusqu'à 30 étages. Ce système est composé de trois éléments importants : un noyau central, en bois ou en béton, des planchers mixtes bois-béton et des poteaux poutres en bois lamellé-collé (Figure 13). Un bâtiment démonstrateur de 8 étages, la *Lifecycle Tower One*, a déjà été construit suivant ce principe à Dornbirn en Autriche en 2012.

LCT (Rhomberg 2012), AUTRICHE
Poteaux-poutres et plancher bois/béton
(© CREE)



TREE (Abrahamsen and Malo 2014), NORVEGE
CLT et poteaux-poutres
(© Rune B Abrahamsen)

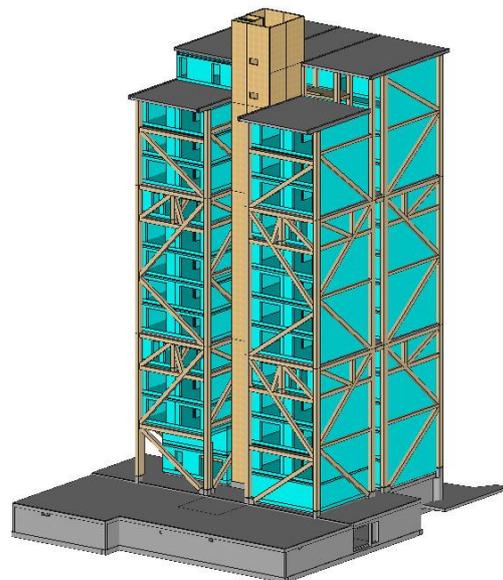


Figure 13 : Systèmes constructifs pour la grande hauteur testés sur des projets concrets

Enfin le plus haut bâtiment bois du monde est actuellement en cours de construction en Norvège et sera livré courant 2015. Le projet utilise un système mixte bois en associant l'usage de poteau-poutre et de panneaux CLT pour la réalisation de 14 niveaux. L'architecte assimile son système à un meuble composé d'étagères et de tiroirs (Figure 13). Des modules 3D sont préfabriqués et superposés par tranche de cinq. Ils ne participent pas à la stabilité horizontale du bâtiment. Un noyau central en CLT constitue la circulation verticale. À cet élément, viennent se raccrocher la structure en poteau-poutre et des plateformes intermédiaires en béton.

Ces projets de grandes hauteurs et leurs applications sur des bâtiments réels montrent que les limites de la construction bois multiétage n'ont pas encore été atteintes. D'un point de vue structural, l'ingénierie de construction bois multiétage est en plein essor et de nombreuses innovations voient le jour. Chaque bâtiment multiétage bois possède aujourd'hui son propre système constructif permettant de répondre à des contraintes de sécurité de l'ouvrage importantes et d'utiliser des éléments plus ou moins standard. L'usage de solutions mixtes bois et métal et bois et béton devient alors cruciale pour bénéficier au mieux des performances mécaniques intrinsèques à chacun des matériaux.

I.3. Besoin d'outils et de méthodes de conception pour gagner en compétitivité

Bien que les avantages environnementaux de l'utilisation du bois dans le bâtiment multiétage soient acceptés par le secteur de la construction, le bois est souvent considéré comme un matériau non approprié en raison d'un manque de confiance concernant la sécurité incendie, l'acoustique, la stabilité et la durabilité de l'ouvrage. En France, plusieurs raisons historiques ont poussé l'abandon des techniques constructives bois au profit du béton. Suite à la Seconde Guerre mondiale, l'industrialisation s'est intensifiée et les techniques et savoir-faire traditionnels ont été peu à peu abandonnés. La construction bois s'est ainsi longtemps limitée à un travail méticuleux d'artisans et de charpentiers disséminés dans de nombreuses petites structures. La construction d'ampleur a alors été prise d'assaut par de grands groupes industriels connus pour leurs réalisations béton et qui aujourd'hui, pour répondre aux objectifs écologiques nationaux, se dotent de nouvelles filiales spécialisées dans la construction bois.

De nombreuses réalisations exemplaires démontrent non seulement la durabilité de l'usage du bois dans des systèmes constructifs multiétages, mais aussi la faisabilité technico-économique de tels ouvrages dans des contextes réglementaires actuels (Annexe A).

À cela s'ajoute une mobilisation nationale en faveur d'immeubles de moyenne et de grande hauteur en bois. Le plan national d'action pour l'avenir des industries de transformations du bois va participer à la promotion de l'utilisation du bois dans la construction et en particulier dans le bâtiment multiétage (Nouvelle France Industrielle 2013, Industrie du futur 2015). Ce plan, qui comporte quatre axes stratégiques déclinés en actions en faveur des entreprises, est soutenu par l'association pour le développement des immeubles à vivre bois (ADIVbois) créé à cette occasion. L'action 11 du troisième axe stratégique consiste à « soutenir l'innovation et la R&D » afin de rehausser la compétitivité de la filière bois dans la construction. Il s'agit de favoriser la capacité d'innovation et d'adaptation aux nouvelles exigences liées au

développement durable. Le but est alors de répondre aux attentes du marché en apportant une forte valeur ajoutée qui plus est compétitive face aux autres industries de la construction. Également dans une optique de compétitivité, l'action 12 vise à « développer le bois dans la construction en caractérisant et qualifiant les performances techniques des bois français,

QUELQUES DATES

Septembre 2013

Lancement de la nouvelle France industrielle

Juin 2014

Validation du Plan industries du Bois

Septembre 2014

Lancement de l'association ADIVbois

Novembre 2014

Assemblée générale constitutive de l'ADIVbois

Courant 2015

Lancement du concours Promotion-

Conception-Construction : 10 immeubles à

vivre en bois d'ici 2017

notamment feuillus, et en développant les marques de qualité volontaires d'une part, et en qualifiant des systèmes constructifs à forte valeur ajoutée d'autre part ». Un effort important de qualification des matériaux et des systèmes constructifs est alors engagé, dans la perspective notamment de constructions bois multiétages. Le plan industrie de reconquête industrielle « industries du bois » dirigé par Franck Mathis (PDG Mathis SA, fabricant et constructeur de lamellé-collé) possède cette ambition. L'une des mesures prévues est donc de faire reconnaître les performances du matériau bois dans la construction en mettant en place des outils et actions pour lever les différents obstacles

à son utilisation tout en développant des analyses objectives pour satisfaire aux demandes écologiques.

En conclusion, au vu de la croissance démographique, les besoins en terme de bâtiments tendent nécessairement vers la construction multiétage quels que soit les systèmes constructifs disponibles. Face à la concurrence du béton et de la construction métallique, ancrée dans les mœurs, le bois doit faire sa place. Plus le bois permettra d'augmenter la hauteur des bâtiments plus il gagnera en crédibilité et en compétitivité. Pour cela, deux axes majeurs doivent être traités. Le bois doit gagner en maîtrise technique, connaissance et ingénierie, mais aussi en valorisation, en visibilité et en confiance

Pour accroître la construction de bâtiments bois à plusieurs étages, des méthodes de conception avec prise en compte des contraintes réglementaires sont donc nécessaires. Ces méthodes doivent aboutir à des solutions techniques compétitives à faible émission de gaz à effet de serre et alliant efficacité énergétique et confort des occupants. C'est dans ce contexte actuel de la construction bois multiétage que se situent ces travaux de thèse. L'objectif est donc de promouvoir l'utilisation du bois en développant des systèmes constructifs performants. Pour cela le développement d'une méthode de conception multicritère de bâtiment prenant en compte le caractère multidisciplinaire de la construction est essentiel.

Chapitre II. Méthodes adoptées en conception multicritère de bâtiment

Le projet de construction d'un bâtiment est un problème de conception multicritère nécessitant la prise en compte de performance d'usage, d'économie, de faisabilité industrielle, d'architecture et d'environnement. La recherche des meilleures solutions possibles constitue un problème d'optimisation multiobjectif où les objectifs sont souvent contradictoires. L'ensemble des variables de décisions considérées définit un espace de solutions que le concepteur doit étudier pour chercher et trouver la meilleure solution correspondant aux exigences et à la volonté de la maîtrise d'ouvrage (décideur). Ce chapitre est dédié à l'état de l'art des méthodes adoptées en conception multicritère dans le domaine du bâtiment et plus particulièrement en optimisation multiobjectif.

La première section explique en quoi la conception multicritère de bâtiments doit passer par la résolution de problèmes d'optimisation multiobjectif. La première partie référence les caractéristiques des principaux problèmes d'optimisation multiobjectif de bâtiments traités dans la littérature. Les méthodes de couplage des méthodes d'optimisation multiobjectif avec les méthodes de prise de décision sont ensuite présentées. Différentes méthodes d'optimisation multiobjectif sont alors énumérées et détaillées. Enfin une dernière partie synthétise l'ensemble des points essentiels relevés dans cet état de l'art et propose une méthodologie d'optimisation multiobjectif de bâtiments.

II.1. La conception multicritère d'un bâtiment : un problème d'optimisation multiobjectif

Les performances visées et exigences à respecter lors de la conception d'un bâtiment sont très variées et appartiennent à des domaines et disciplines diverses où la prise en compte de la sécurité de l'ouvrage, de l'industrialisation, du coût, du confort de l'utilisateur, et des impacts environnementaux sont essentiels à l'élaboration de bâtiments durables, fonctionnels, innovants et compétitifs (Figure 14).

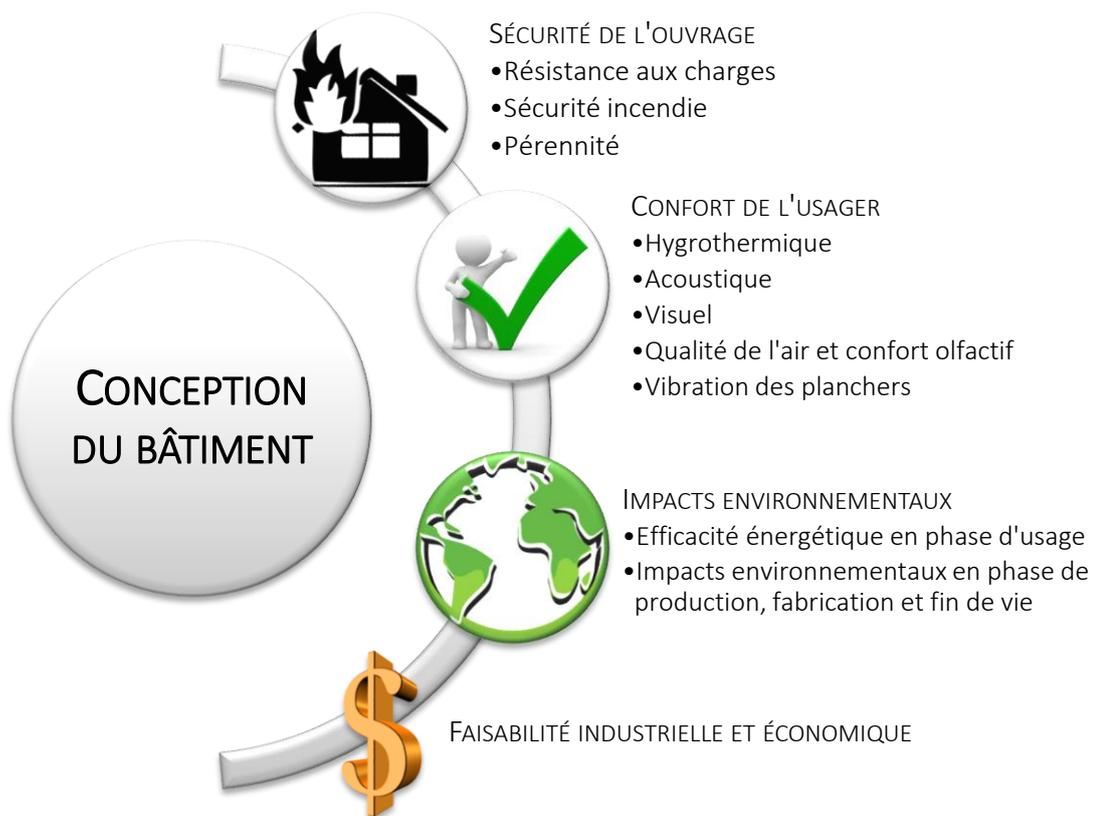


Figure 14 : Illustration de la conception multidisciplinaire et multicritère du bâtiment

Traditionnellement, la conception multicritère d'un bâtiment s'effectue en traitant les disciplines indépendamment et successivement. La méthode utilisée dans la conception des bâtiments vise ainsi l'optimisation d'une solution de référence par itérations successives, mais se limite à son amélioration. Cette recherche itérative est généralement réalisée à partir d'une solution de référence et de l'utilisation de l'expertise pour chaque discipline traitée. Seules quelques solutions sont alors testées. Flager & Haymaker (2007) ont réalisé une étude portant sur l'efficacité de la conception traditionnelle des bâtiments par recherche itérative. L'un des buts de leur étude était de déterminer approximativement le nombre d'itérations réalisables au cours d'un projet de durée standard. Sur une période de 12 semaines, seules deux itérations ont intégralement été réalisées. Ainsi à l'issue d'une recherche itérative très peu de solutions sont proposées, les choix possibles sont donc restreints et la solution finale n'est pas nécessairement optimale et est le plus souvent basée sur l'expérience du concepteur.

Un autre type de recherche itérative plus élaboré consiste à réaliser des variations paramétriques. Il s'agit de faire varier à chaque itération une ou deux variables à la fois tout en fixant les autres variables (Stevanović 2013). Cette méthode ne permet pas non plus l'obtention de solutions optimales sur l'ensemble du domaine de conception.

L'approche de recherche itérative se résume donc le plus souvent à l'amélioration d'une solution. Ce sont ordinairement les contraintes et le seul critère économique qui orientent alors ce processus.

Frenette (2009) fait la distinction entre deux catégories de performances : d'une part les contraintes de conception qui correspondent à un niveau de performance minimal exigé par le cadre réglementaire, par exemple le respect des Eurocodes, de la Réglementation Thermique 2012 et de la Nouvelle Réglementation Acoustique. D'autre part les performances d'usage qui dépendent de la volonté de la maîtrise d'ouvrage ou de l'utilisateur final. Contrairement au respect des contraintes réglementaires, une optimisation des performances d'usage peut constituer une plus-value. Le but est alors de choisir l'une des meilleures alternatives possible au regard des objectifs de performance visés tout en respectant les contraintes réglementaires. Il s'agit alors de résoudre un problème d'optimisation multiobjectif.

Les premiers projets visant la résolution de problèmes d'optimisation multiobjectif dans le domaine du bâtiment ont fait leur apparition dans les années 80 et 90 avec une prise en compte des consommations de chauffage, des coûts d'investissement, de critères architecturaux, du confort visuel et du confort thermique (Radford and Gero 1980; Gero et al. 1983; D'Cruz and Radford 1987; Marks 1997).

Aujourd'hui, la recherche scientifique dans le domaine de l'optimisation multiobjectif des bâtiments est en plein essor. Une interrogation de la base bibliographique internationale Scopus, avec des mots clefs relatifs à l'optimisation multiobjectif de bâtiments¹³, montre une tendance croissante du nombre de publications annuelles retracé sur la Figure 15. La montée en puissance des travaux scientifiques dans ce domaine est attestée par la parution de plusieurs articles qui font le point sur l'état de l'art et plus spécifiquement dans la construction durable (Attia et al. 2013; Evins 2013; Stevanović 2013; Nguyen et al. 2014; Machairas et al. 2014).

¹³ La recherche a été réalisée à partir des mots clefs suivant : (optimi*ation AND building AND (multiobjective OR multicriteria OR Pareto OR multi-criteria OR multi-objective)) en incluant les titres, résumés et mots-clefs. Le symbole * peut se voir attribuer l'ensemble des caractères de l'alphabet. Ainsi, les deux orthographes britannique et américaine du mot optimisation (*optimisation* et *optimization*) sont considérées dans cette recherche.

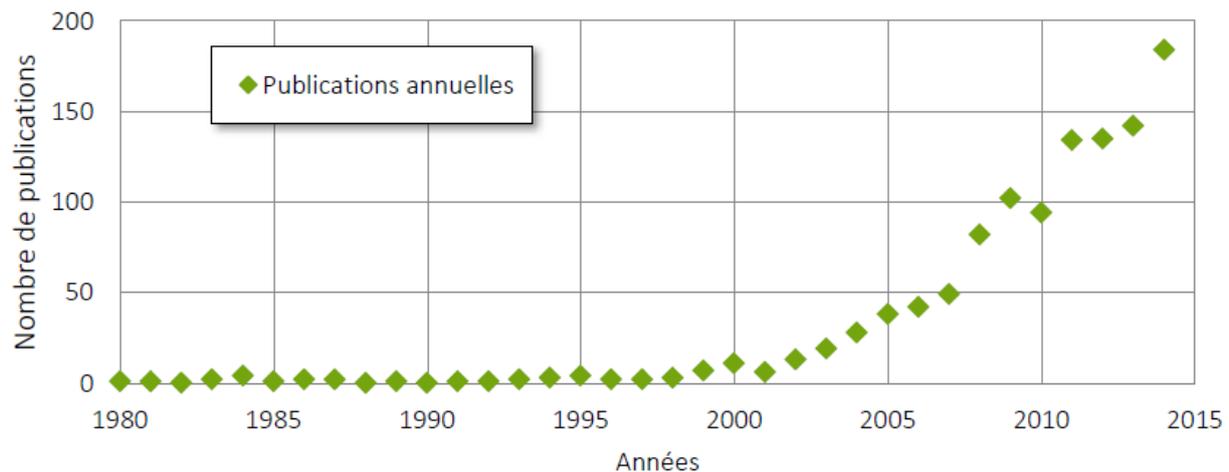


Figure 15 : Évolution du nombre de publications dans le domaine de l'optimisation multiobjectif de bâtiments répertoriés dans la base bibliographique internationale Scopus

II.2. Formulation des problèmes d'optimisation multiobjectif dans le bâtiment

D'après Roy et al. (2008) la classification des problèmes d'optimisation dépend du type de variables, des objectifs à optimiser, des contraintes, des disciplines considérées et du contexte de conception. Une phase préliminaire cruciale consistant à la formulation du problème d'optimisation est nécessaire pour choisir la méthode d'optimisation appropriée (Wright et al. 2002). Cette phase préliminaire vise la caractérisation et la détermination de la complexité du problème d'optimisation à résoudre. Les objectifs de l'optimisation doivent être choisis, les variables de décision dont ils dépendent sélectionnées et les contraintes de conception fixées.

II.2.a Les objectifs

Les objectifs à optimiser sont évalués à partir de fonctions-objectif qui sont des modèles mathématiques ou algorithmiques pouvant être minimisés ou maximisés. Les meilleures performances d'usage sont recherchées en optimisant simultanément les objectifs tout en respectant les contraintes. Le nombre d'objectifs, la nature des fonctions-objectif correspondantes et leur interdépendance impactent la complexité de la conception. Le type des fonctions-objectif dépend du niveau de connaissance des phénomènes. Si la connaissance disponible est complète et quantitative les fonctions seront algébriques quantitatives, si la connaissance est quantitative et qualitative pour partie les fonctions seront des algorithmes incluant la connaissance qualitative. Les fonctions-objectif quantitatives peuvent être le résultat de simulations numériques (ex : STD, CFD), de calculs analytiques ou empiriques. Les fonctions-objectif qualitatives sont généralement moins utilisées, car elles nécessitent le développement d'une algèbre qualitative au préalable.

Dans le domaine de la construction durable, les objectifs considérés sont le plus souvent de minimiser la consommation énergétique et le coût économique d'un bâtiment (Attia et al. 2013; Evins 2013). Les objectifs sont donc couramment de minimiser les consommations ou

besoins énergétiques (utilisés dans 60% des cas d'après Evins (2013)) et de minimiser les coûts d'investissement, d'usage ou de cycle de vie. La maximisation du confort thermique arrive en troisième position suivi de la minimisation des émissions de dioxyde de carbone et de diverses considérations liées à la maximisation du confort lumineux. D'autres objectifs à optimiser plus occasionnels sont liés à des aspects de structure, de compacité et d'énergie grise (Figure 16).

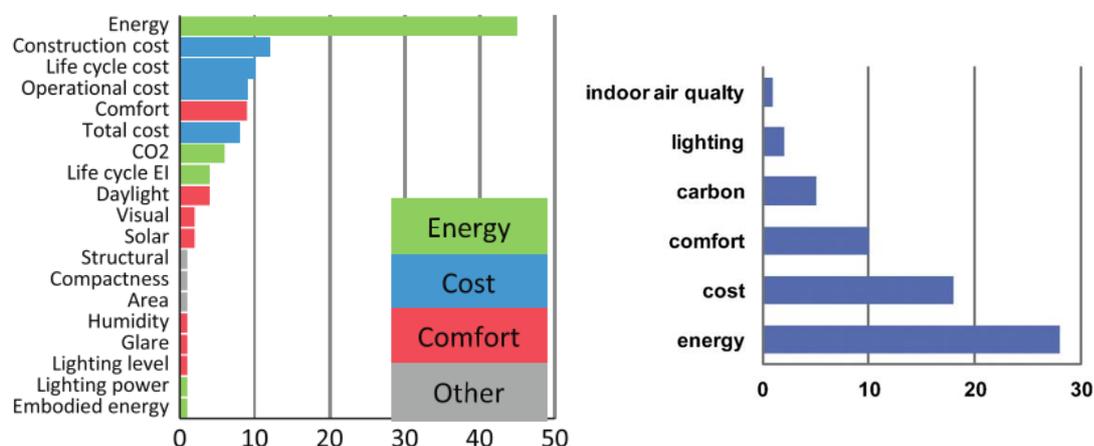


Figure 16 : choix des fonctions-objectif à optimiser dans la construction durable (Evins 2013) à gauche (nombre de travaux étudiés sur 74) et le bâtiment zéro énergie (Attia et al. 2013) à droite (nombre d'experts interrogés sur 28)

Concernant l'optimisation des structures porteuses d'autres objectifs peuvent être considérées en plus de la minimisation du coût (Bitam and Belarbi 2006) telles que la minimisation du poids de la structure (Plevris and Papadrakakis 2010; Flager et al. 2011; Gholizadeh and Fattahi 2012) ou de la longueur cumulée des éléments qui la constituent (Baldock and Shea 2006). Dans les constructions métalliques, ces deux derniers objectifs tendent à aller dans le même sens qu'une optimisation économique et permettent de s'affranchir des incertitudes relatives aux variations rapides des différents coûts. Il est à noter que généralement dans ce domaine, un seul objectif est optimisé et que le but consiste à minimiser le coût de la structure tout en respectant des contraintes mécaniques.

Les problèmes traitant simultanément des objectifs de performance thermique et mécanique sont rares. Par exemple Quaglia et al. (2014) cherche à minimiser les besoins cumulés de chauffage et de rafraîchissement d'une part et la flèche maximum de la structure d'autre part pour l'optimisation de tentes militaires et habitats d'urgence. Flager et al. (2009) minimise simultanément les coûts de la structure et les coûts énergétiques sur le cycle de vie du bâtiment. L'optimisation simultanée d'objectifs provenant de disciplines différentes requiert l'expertise sur chacune des disciplines. Les relations d'interdépendances entre disciplines doivent être établies et les variables de décisions communes aussi.

II.2.b Les variables de décisions

Les variables de décisions sont les paramètres sur lesquels le concepteur peut agir pour optimiser le bâtiment. Le nombre de variables, leur nature, leur domaine de validité et leurs dépendances affectent la complexité générale de la conception.

Deux types de variables peuvent être distinguées (Eric Brunelle 2008) : les variables qualitatives qui s'expriment en modalité et les variables quantitatives qui s'expriment en valeurs. Parmi les variables qualitatives, il y a les variables qualitatives nominales (aucun ordre précis, ex : type de plancher) et les variables qualitatives ordinales (contiennent un ordre, ex : petit/moyen/grand). Parmi les variables discrètes, il y a les variables quantitatives discrètes (ex. : nombre de plis pour un panneau CLT) et quantitatives continues (ex. : profondeur d'une casquette solaire).

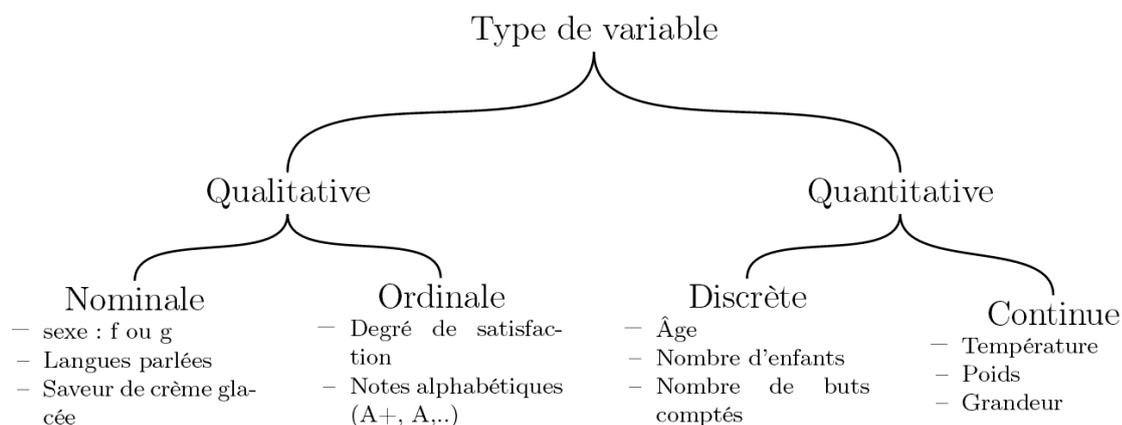


Figure 17 : Diagramme des différents types de variables (Eric Brunelle 2008)

Sur 10 travaux étudiés, Nguyen et al. (2014) relèvent en moyenne l'utilisation de 15 variables (maximum de 24 et minimum de 8). Ces variables peuvent être quantitative discrètes ou qualitative et prendre un nombre de valeurs ou modalités limitées. Souvent les variables qualitatives sont retranscrites en variables discrètes en attribuant à chaque modalité une valeur discrète. Elles peuvent autrement être continues et définies dans un intervalle donné. Par exemple, si l'une des variables correspond au type de vitrage utilisé dans la composition de l'enveloppe, la variable pourra être discrétisée. Un double vitrage pourra se voir attribuer la valeur 1 et un triple vitrage la valeur 2. À l'inverse si l'une des variables correspond à la profondeur d'une protection solaire de ce vitrage de type casquette, celle-ci peut être représentée par une variation continue entre une valeur minimum (ex. : zéro mètre) et une valeur maximum (ex. : trois mètres), il s'agit d'une variable continue. Lorsqu'un problème de conception comprend des variables discrètes et continues, il est qualifié de problème à variables mixtes et son espace de solution est non-convexe et discontinu (Nguyen et al. 2014). Dans le domaine du bâtiment il est très courant que certaines variables soient discrètes et d'autres continues.

Attia et al. (2013) ont effectué un sondage sur l'optimisation de « bâtiments dont la consommation d'énergie est quasi nulle »¹⁴ ; les résultats montrent que sur 28 experts questionnés, 53% utilisent des variables relatives aux systèmes énergétiques, le même nombre

¹⁴Le terme de « Bâtiment dont la consommation d'énergie est quasi nulle » est défini dans la directive européenne 2010/31/UE (2010) à l'Article 2, paragraphe 2 comme étant « un bâtiment qui a des performances énergétiques très élevées déterminées conformément à l'annexe I. La quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité » En anglais ce terme est traduit par « Net Zero Energy Buildings » (NZEB).

d'experts étudie des variables correspondantes aux scénarios de contrôle et 50% traitent des variables de l'enveloppe. Arrive ensuite l'utilisation de variables des systèmes de production d'énergie renouvelable, du stockage thermique et de la géométrie du bâtiment. D'un expert à l'autre, le type de variable considéré peut donc être très différent. Ainsi cela dépend de l'objet d'étude et du contexte dans lequel il s'inscrit. Les éléments suivants font souvent l'objet d'études spécifiques dans les projets de construction durable (Evins 2013) :

- l'enveloppe du bâtiment qui comprend notamment des variables concernant l'assemblage, l'épaisseur et les matériaux des différents composants (Sambou et al. 2009; Fesanghary et al. 2012; Gossard et al. 2013; Nguyen and Reiter 2014; Aparicio Ruiz et al. 2014; Axaopoulos et al. 2014; Baglivo et al. 2014) ;
- la géométrie et la forme du bâtiment qui comprennent également l'orientation, la superficie vitrée et le dimensionnement des protections solaires (Gero et al. 1983; Wang et al. 2006; Lin and Gerber 2014) ;
- les façades double-peau (Rapone and Saro 2012) ;
- le dimensionnement, le choix et le contrôle des systèmes énergétiques (Chauffage Ventilation et Climatisation CVC) (Wright et al. 2002) ;
- l'éclairage (Welle et al. 2012) ;
- les systèmes innovants de cogénération, de production solaire et de stockage thermique ;
- la conception holistique des bâtiments résidentiels (Verbeeck 2007; Hamdy 2012) ;
- la conception holistique de la rénovation (Chantrelle et al. 2011; Rivallain 2013; Antipova et al. 2014).

Un autre objet d'étude fréquemment optimisé dans le domaine de la construction concerne les structures porteuses. Des variables telles que les caractéristiques dimensionnelles des différents éléments, le type des assemblages et le type des appuis peuvent par exemple être considérées (Bitam and Belarbi 2006). D'autres variables d'ordre géométriques peuvent également être considérées (Flager and Haymaker 2007; Quaglia et al. 2014).

II.2.c Les contraintes

Pour correspondre à la réalité industrielle, les problèmes d'optimisation de bâtiment doivent respecter des exigences spécifiques exprimées à partir de contraintes. Ces contraintes peuvent être sur les variables et d'autres sur les objectifs.

Les contraintes sur les variables sont généralement traitées dans la définition de leur domaine de variation. Par exemple, une variable discrète prend un certain nombre de valeurs données (Roy et al. 2008) ; Wang et al. (2006) parlent alors de contraintes de sélection (*selection constraints*). Pour une variable continue, ce sont les valeurs prises par les bornes de son intervalle de variation qui constituent des contraintes de seuil (*box constraints*).

Lorsque les exigences d'un problème d'optimisation nécessitent la satisfaction d'un ensemble de relations entre les variables de décision, elles sont exprimées sous forme d'équations et d'inéquations (Sana Ben Hamida 2014). Un problème d'optimisation multiobjectif peut alors être formulé suivant l'équation [II.1] où \vec{F} est un ensemble de m fonctions-objectif de

dimension n , correspondant au nombre de variables de décisions et G_i et H_j sont respectivement des contraintes d'inégalité et d'égalité (Ndiaye et al. 2009).

$$\begin{aligned} & \text{Optimiser } \vec{F} = [F_1(\vec{X}), F_2, \dots, F_m(\vec{X})] \\ & \text{sous les contraintes } G_i(\vec{X}) \leq 0 \text{ et } H_j(\vec{X}) = 0 \end{aligned} \quad \text{[II.1]}$$

où :

- $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathfrak{R}^n$ le vecteur des variables de décision ;
- $F_q : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ pour $q=1, \dots, m$, les fonctions-objectif ;
- $G_i, H_j : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ pour $i=1, \dots, s$ et $j=1, \dots, l$, les contraintes.

Par exemple, pour l'optimisation multiobjectif des programmes de réhabilitation de bâtiments, Rivallain (2013) minimise simultanément la consommation cumulée d'énergie primaire, le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, le potentiel de changement climatique, le potentiel d'acidification, l'inconfort thermique estival, le coût global sur le cycle de vie et le coût d'investissement. Une contrainte budgétaire maximale de 70k€ est alors appliquée à chacune des phases de réhabilitation.

Nguyen et Reiter (2014) tiennent compte d'une contrainte de confort thermique pour la minimisation simultanée des coûts d'investissement et de l'inconfort thermique estival d'un logement. Ainsi lorsque le pourcentage d'heure d'inconfort annuel est supérieur à 10%, la fonction-objectif correspondant au coût d'investissement est fortement pénalisée selon le second terme de l'équation [II.2].

$$F_{\text{coût}}(\vec{X}) = \frac{\text{Coût}(\vec{X})}{\text{Coût}_{\text{max}}} + 10 \times \left[\max(0; T\text{conf}(\vec{X}) - 10) \right]^2 \quad \text{[II.2]}$$

où :

- $F_{\text{coût}}$ est la fonction-objectif correspondant au coût d'investissement ;
- Coût est le coût d'investissement ;
- $T\text{conf}$ est le pourcentage d'inconfort thermique annuel ;
- Coût_{max} est le coût maximum d'investissement.

Tout comme les variables de décision, les contraintes peuvent être très différentes d'un problème à l'autre. Néanmoins dans la majorité des cas, dans la construction durable, les conditions de confort sont contraintes par des normes ou réglementations (Attia et al. 2013). La maîtrise du coût peut également être traitée en tant que contrainte plutôt qu'en tant qu'objectif. Les problèmes d'optimisation de structure porteuse font généralement intervenir des contraintes mécaniques (Flager and Haymaker 2007). D'autres contraintes plus rares peuvent être trouvées comme des contraintes d'emballage utilisées par Quaglia et al. (2014) pour l'optimisation de tentes militaires et habitats d'urgence.

II.3. De l'optimisation à la décision et *vice-versa*

Pour mener à terme la résolution d'un problème d'optimisation multiobjectif, l'étape d'optimisation doit être associée à une étape de prise de décision. Selon la combinaison des étapes d'optimisation et de prise de décision, trois méthodologies d'optimisation multiobjectif se distinguent (Horn 1996; Colette and Siarry 2002) : Les méthodes d'optimisation *a priori* où l'aide à la décision précède l'optimisation, les méthodes d'optimisation *a posteriori* où la décision succède à l'optimisation et les méthodes d'optimisation *progressives* où l'aide à la décision s'effectue au cours de l'optimisation.

II.3.a La décision multicritère précède l'optimisation

Dans cette méthodologie, les fonctions-objectif sont combinés en une seule fonction-objectif. Les critères de préférence du décideur sont alors implicitement inclus dans l'étape d'optimisation. Le compromis désiré est ainsi déterminé avant d'exécuter la méthode d'optimisation.

Généralement, les fonctions-objectif et critères de choix sont regroupés en une seule fonction-objectif par agrégation complète ou par agrégation partielle. Il s'agit alors d'optimiser une fonction unique où chaque objectif peut être considéré comme étant une variable d'optimisation. Le problème est ainsi ramené à un problème d'optimisation mono-objectif. L'avantage de cette méthode est sa flexibilité dans le choix d'un algorithme d'optimisation mono-objectif. De plus, si la méthode d'agrégation et les pondérations sont bien choisies cette méthode a l'avantage d'être rapide à exécuter puisqu'elle ne nécessite qu'une seule exécution pour obtenir le compromis souhaité.

Wang et al. (2003) ont ainsi combiné des objectifs de coût et d'impact environnemental en se basant sur l'exergie¹⁵ dépensée en phase de réalisation et d'utilisation et en faisant varier des paramètres relatifs à l'enveloppe, à l'orientation et à la géométrie du bâtiment. Par contre, ils soulèvent un des principaux défauts de cette méthode agrégative à savoir qu'elle conduit à une solution unique pour chaque jeu de pondérations utilisé. Ainsi le concepteur n'a pas de visibilité sur l'impact de la variation d'un objectif sur un autre objectif.

Cette méthode présente de nombreuses autres difficultés. L'une d'entre elles concerne l'hétérogénéité des fonctions-objectif considérées. Les unités et les ordres de grandeur peuvent être très différents d'une fonction-objectif à l'autre. Le choix des pondérations nécessite non seulement la prise en compte de cet aspect, mais également une bonne connaissance du problème à optimiser et donc un niveau d'expertise élevé. Les résultats dépendent alors largement de la méthode d'agrégation et des pondérations utilisées. Enfin, la finalité de cette méthode qui est de conduire à une solution unique ne permet pas de revenir

¹⁵ L'exergie est une grandeur issue de la thermodynamique qui s'exprime en Joules et qui permet de mesurer la qualité d'une énergie. Il s'agit du travail théorique maximum récupérable au cours d'un processus irréversible de transformation d'un système. Elle permet également de mesurer les émissions de déchet.

sur un des critères de décision sans une nouvelle exécution. Un niveau d'expertise élevé est donc requis lors de la phase de décision multicritère pour limiter le nombre de répétitions.

II.3.b L'optimisation précède la décision multicritère

Cette méthodologie vise l'obtention d'un ensemble de solutions optimales parmi lesquelles le décideur effectue un choix. Aucun critère de préférence n'est alors incorporé dans l'étape d'optimisation. Cette étape vise ainsi l'obtention des solutions qui constituent les meilleurs compromis entre les différents objectifs.

Le principal avantage de cette méthode est son potentiel d'analyse des compromis obtenus permettant d'accroître la connaissance et la compréhension du problème à optimiser. Il est ainsi possible d'observer l'influence des variables de décisions sur les objectifs à optimiser. Cette méthodologie permet non seulement de se passer d'un niveau d'expertise élevé durant l'étape d'optimisation, mais aussi d'en acquérir durant l'étape d'analyse multicritère. L'inconvénient principal est que l'espace des solutions conserve sa complexité après l'étape d'optimisation. Le développement et l'usage de méthodes d'analyse multicritère spécifiques sont alors nécessaires pour orienter le choix d'un compromis adapté à un contexte donné. De plus, la visualisation de plus de trois objectifs n'est pas évidente. Enfin l'usage de méthodes d'optimisation mono-objectif n'est généralement pas adapté. Il est alors nécessaire d'avoir recours à d'autres méthodes d'optimisation multiobjectif.

Recherche des compromis optimaux au sens de Pareto

Un compromis est optimal au sens de Pareto¹⁶ s'il n'est pas possible d'améliorer un objectif sans en dégrader un autre, la solution est dite non-dominée. À l'inverse, si l'un des objectifs peut être amélioré sans n'en dégrader aucun autre, c'est que le compromis n'est pas optimal. Le compromis est dominé au moins par la solution que représente sa propre amélioration. Les solutions optimales au sens de Pareto (solutions non dominées) sont les solutions qui dominent les autres, mais ne se dominent pas entre elles. Elles forment ainsi une surface de compromis appelée front de Pareto (Figure 18).

En considérant que l'ensemble des fonctions-objectif doivent être minimisées, l'optimalité locale et l'optimalité globale au sens Pareto se définissent comme suit (Colette and Siarry 2002) : Un vecteur $\vec{X} \in \mathfrak{R}^n$ est optimal localement au sens de Pareto s'il n'existe pas de vecteur \vec{X}' dans le voisinage de \vec{X} tel que \vec{X}' domine le vecteur \vec{X} . Un vecteur $\vec{X} \in \mathfrak{R}^n$ est optimal globalement au sens de Pareto s'il n'existe pas de vecteur $\vec{X}' \in \mathfrak{R}^n$ tel que \vec{X}' domine le vecteur \vec{X} (équation [II.3]).

$$\boxed{\exists \vec{X} \in \mathfrak{R}^n \wedge \nexists \vec{X}' \in \mathfrak{R}^n : \forall q \in \{1, \dots, k\}, F_q(\vec{X}') \leq F_q(\vec{X}) \wedge \exists q \in \{1, \dots, k\}, F_q(\vec{X}') < F_q(\vec{X})} \quad [\text{II.3}]$$

¹⁶ Nommé d'après l'économiste italien, Vilfredo Pareto, l'optimum de Pareto est à l'origine un état de la société dans lequel il n'est pas possible d'améliorer le bien-être d'un individu sans détériorer celui d'un autre.

Dans le domaine de la construction durable, l'optimisation multiobjectif avec obtention d'un front de Pareto est en nette progression avec plus de la moitié des études réalisées ces deux dernières années (Evins 2013). Elle représente 49% de l'ensemble des problèmes d'optimisation traités dans la construction ou réhabilitation durable. Les méthodes d'optimisation multiobjectif sont abordées dans la section II.4.d de ce chapitre.

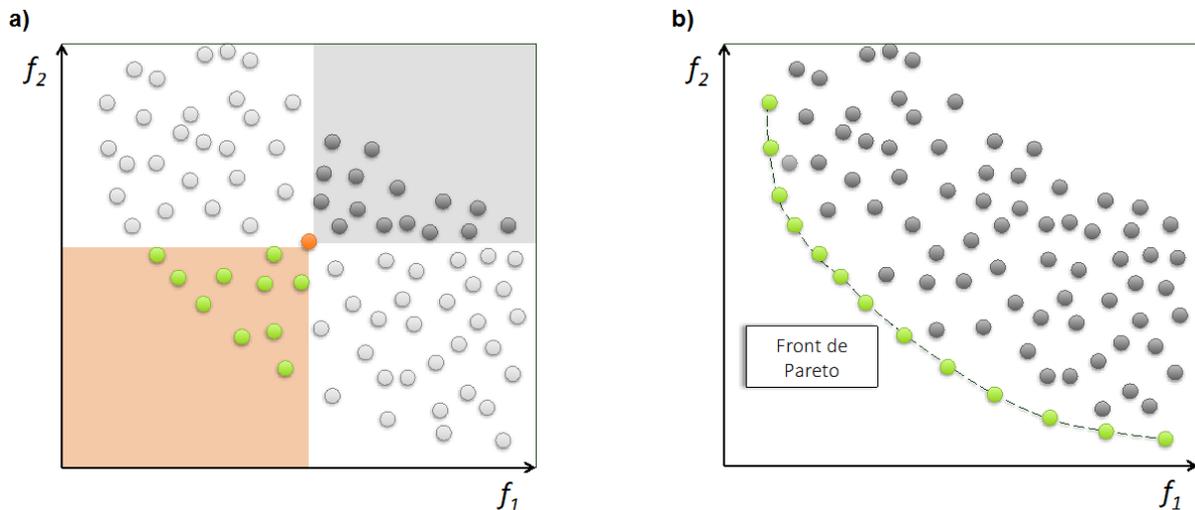


Figure 18 : Illustration de la dominance au sens de Pareto. a) le point orange domine les points gris foncés et est dominé par les points verts. b) Les points verts sont non-dominés et forment le front de Pareto.

Aide à la décision par analyse multicritère

Afin d'effectuer un choix parmi un ensemble de solutions plusieurs travaux de recherche s'orientent vers des méthodes d'analyse multicritère (Frenette 2009; Wang et al. 2009; Mela et al. 2012). Elles s'appuient sur plusieurs critères préalablement fixés. Des étapes essentielles sont nécessaires à leur réalisation telles que la définition des critères de performance, l'évaluation des alternatives, le choix de la méthode d'analyse multicritère et l'établissement de son paramétrage. Dans un premier temps, il s'agit de dresser la liste des actions ou alternatives potentielles puis de dresser la liste des critères à prendre en considération. Une fois la méthode d'analyse multicritère choisie il s'agit de déterminer les seuils et pondérations et de passer à l'évaluation des alternatives. La phase de décision est ensuite abordée.

Plusieurs acteurs interviennent durant ces étapes : le décideur (ou les décideurs) à qui il revient de faire le choix final, l'analyste qui va poser le problème selon les besoins du décideur et les évaluateurs lorsque la connaissance nécessaire à l'évaluation des différents critères requiert un certain niveau d'expertise.

Les alternatives potentielles sont alors évaluées les unes par rapport aux autres au moyen de critères de sélection préalablement définis. Ces critères peuvent être classés selon trois échelles. Les échelles nominales sont des échelles non ordonnées qui classent les solutions selon une catégorie unique (ex. : blanc ou noir). Les échelles ordinales permettent d'évaluer les solutions selon des relations ordonnées (ex : pas du tout, un peu, beaucoup). L'écart entre les différents niveaux (non linéaire) des échelles nominales et ordinales ne peut être représenté par une échelle cardinale linéaire. À l'inverse, l'écart entre les différents niveaux des échelles

cardinales est linéaire et est compatible avec les opérations logiques, arithmétiques et mathématiques. Il peut donc être représenté par une échelle cardinale linéaire. Toutefois, les échelles non linéaires peuvent être converties en échelles cardinales moyennant l'avis d'un expert (Frenette 2009).

Il existe ainsi différentes méthodes d'analyse multicritère, leur objectif étant de trouver la solution la plus adéquate pour un contexte donné qui dépend des parties prenantes de l'opération. Ces méthodes d'aide à la décision multicritère peuvent se regrouper en trois grandes familles (Taillandier 2009) :

- *Les méthodes à critère unique de synthèse*

Ces méthodes permettent à la fois de choisir, trier et classer les différentes solutions envisagées grâce à l'utilisation d'un seul critère. Les valeurs de chacun des critères d'une alternative sont alors agglomérées en une valeur unique. Un système de pondération peut alors être utilisé pour tenir compte de l'importance des différents critères relativement les uns aux autres. Bien que pratiques, ces méthodes introduisent de nombreuses incertitudes résultant du choix des différentes pondérations et demandent que les critères soient mesurés sur des échelles cardinales avec des niveaux de référence définis (Frenette 2009).

- *Les méthodes de surclassement de synthèse*

Ces méthodes visent la construction de relations de surclassement entre les différentes alternatives. Elles permettent de sélectionner ou trier les solutions qui sont comparables entre elles, sans pour autant proposer une unique solution. Des échelles non cardinales peuvent être utilisées et les incertitudes liées aux choix des pondérations sont plus limitées que pour les méthodes à critère unique.

- *Les méthodes par itération*

À partir d'une solution de départ, ces méthodes consistent à explorer les solutions voisines et à les comparer à la solution initiale. Ces méthodes permettent à chaque itération de type essai-erreur d'éliminer les solutions les plus éloignées de l'objectif fixé. Toute la difficulté réside justement dans le choix de cet objectif et de l'initialisation du problème.

Mela et al. (2012) proposent de comparer des outils d'analyse multicritère pour choisir une solution sur le front de Pareto selon un contexte donné. Leur étude reprend les résultats de trois travaux sur l'optimisation multiobjectif de bâtiments performants (Wang et al. 2005; Geyer 2009; Fesanghary et al. 2012). Dans ces travaux le choix final d'une solution n'avait pas été défini sur le front de Pareto. Mela et al. (2012) intègrent ainsi la question de la méthode de prise de décision à utiliser à la suite d'une étape d'optimisation multiobjectif. L'étude porte ainsi sur un bâtiment tertiaire, un bâtiment de réception et un bâtiment résidentiel. Pour ces cas d'études, deux, trois et quatre critères ont respectivement été considérés. Plusieurs méthodes à critère de synthèse unique et à surclassement de synthèse ont été utilisées et comparées sur les trois cas d'étude (somme pondérée, produit pondéré, VIKOR, TOPSIS, PROMETHEE et la procédure PEG (Pareto-Edgeworth-Grierson)). Plus le nombre de critères augmente, plus les résultats obtenus par les différentes méthodes divergent. Lorsqu'il n'y a que

deux critères de décisions, les auteurs préconisent de tracer un graphe par nuage de points représentant chacune des alternatives avec l'un des critères en abscisse et l'autre en ordonnées. Ils considèrent que ce graphe est suffisant pour aider au choix d'une solution. Lorsqu'il y a plus de deux critères, les auteurs conseillent d'appliquer dans un premier temps la procédure PEG. Cette procédure consiste à trouver la solution qui soit la plus acceptable au regard de l'ensemble des critères considérés. Si la solution obtenue n'est pas satisfaisante pour le décideur alors l'une des méthodes d'analyse multicritère testée devra être utilisée.

Dans le domaine de la construction bois, deux travaux portant spécifiquement sur la mise en œuvre de méthodes d'aide à la décision quant au choix d'un système constructif ont été recensés. Mussier (1998) élabore une démarche d'aide au choix destinée aux phases précoces de conception pour les solutions constructives bois. Le bâtiment est décomposé en éléments (sous-systèmes) ayant chacun des fonctions spécifiques. À partir de cette décomposition, une première étape consiste à déterminer les sous-systèmes admissibles. Les contraintes imposées par les données du projet doivent être respectées (exigences réglementaires, architecturales...). Une deuxième étape concerne la compatibilité des sous-systèmes entre eux (mise en œuvre, compatibilité des liaisons...). Lorsque deux sous-systèmes ne sont pas compatibles, leur association n'est pas conservée et les alternatives correspondantes sont éliminées de l'ensemble des choix possibles. L'étape finale consiste en une agrégation partielle permettant de trier et/ou de classer les alternatives réalisables restantes (ELECTRE). Ainsi c'est le classement d'un ensemble d'alternatives pour un projet donné et non le choix d'une seule solution qui résulte de cette méthode. Des aspects techniques liés à l'utilisation du bois ont été considérés dans les critères de décision tels que la stabilité de l'ouvrage (dimensionnement et contreventement), la protection du bois (étanchéité à l'air, étanchéité à l'eau, protection biologique et protection incendie) et l'isolation (acoustique et thermique). Le coût de réalisation et le coût d'entretien ont également été intégrés en tant que critère de décision.

Frenette (2009), s'est focalisée sur les méthodes d'aide à la décision multicritère pour le choix d'un mur extérieur préfabriqué en ossature bois. L'objectif de la méthodologie développée est de permettre à un concepteur d'évaluer et de comparer différentes compositions de mur à ossature légère en bois en considérant simultanément plusieurs critères de performance dans un contexte climatique, culturel et socio-économique donné. Dans un premier temps, les solutions sont évaluées selon leur acceptabilité. La résistance structurale, la performance au feu, la résistance thermique, la perméabilité à l'air et des mesures obligatoires de gestion de l'humidité doivent respecter des seuils minimums de performances pour pouvoir être acceptées. Ensuite les solutions acceptables sont évaluées selon des critères de performances que sont la gestion de l'humidité, l'atténuation des bruits aériens, les coûts de construction, d'entretien et d'énergie liée au chauffage ainsi que les impacts environnementaux. Pour l'évaluation des impacts environnementaux, un indice environnemental unique a été défini (Frenette et al. 2010). Enfin, quatre procédures d'agrégation multicritères sont utilisées (somme pondérée, MACBETH, ELECTRE II et PROMETHEE) pour classer les alternatives selon l'information quantitative et qualitative. L'étude montre que la sélection de la procédure d'agrégation la plus appropriée dépend de la nature des échelles de mesure utilisées.

II.3.c La prise de décision s'effectue durant l'optimisation

Cette méthode est similaire à la précédente mise à part qu'elle réitère les étapes alternativement jusqu'à l'obtention d'une solution unique. Le décideur est donc questionné au cours de l'optimisation. Une première optimisation est effectuée pour permettre au décideur d'avoir une idée des compromis à réaliser. Le décideur peut donc fixer des variables de décision et ainsi réduire l'espace des solutions avant de relancer une nouvelle étape d'optimisation. Cette méthode a donc l'avantage d'être progressive. L'inconvénient de cette méthode est la disponibilité requise du décideur tout au long de l'optimisation.

II.4. Méthodes d'optimisation multiobjectif utilisées en conception de bâtiments

De nombreuses méthodes d'optimisation multiobjectif existent. Un grand nombre de ces méthodes ont été recensées et décrites dans l'ouvrage de Colette et Siarry (2002). Seul un nombre limité de ces méthodes, spécifiquement utilisées en conception de bâtiments, sont explicitées dans la suite de cette section.

II.4.a Méthodes d'optimisation exacte par énumération exhaustive

L'optimisation par énumération exhaustive ou *brute-force* en anglais, consiste à évaluer l'intégralité des alternatives pour l'ensemble des fonctions-objectif prises simultanément dans un domaine de conception fini ou discrétisé. Partant d'un modèle de calcul thermique statique, Gero et al. (1983) ont utilisé cette méthode pour optimiser simultanément les coûts d'investissement, les besoins de chauffage et la surface utile en faisant varier la géométrie d'un bâtiment et les propriétés des parois vitrées. Le principal avantage de cette méthode est la garantie d'obtention de l'ensemble des meilleurs compromis se situant sur le front de Pareto. Toutefois, selon le nombre d'objectif, de variables et la nature des fonctions-objectif la recherche exhaustive peut prendre un temps de calcul considérable et non acceptable (Evins 2013; Machairas et al. 2014). Le nombre d'objectifs, de variables et la complexité des modèles de calcul des fonctions-objectif doivent alors être réduits.

Dans cette optique, une alternative consiste à substituer les modèles numériques. Il s'agit alors d'obtenir des métamodèles alliant la rapidité de calcul d'un modèle simplifié avec un niveau de précision proche de celui d'un modèle numérique. Par exemple, Chlela (2008) a déterminé des modèles polynomiaux représentatifs des besoins de chauffage et de rafraîchissement à partir de la méthode des plans d'expérience appliquée à des modèles de simulation thermique dynamique selon trois climats différents. Cinq valeurs ont été attribuées pour chacune des 10 variables de décision considérées, ce qui correspond à un espace de près de 10 millions d'alternatives. Les fonctions-objectif ont ensuite été calculées sur l'ensemble du domaine d'étude pour en déduire une méthode de conception de bâtiment à basse consommation basée sur des abaques. L'auteur souligne néanmoins que les limites du logiciel MATLAB utilisé pour réaliser cette analyse ont été atteintes et qu'il n'était donc pas possible de traiter plus de 10 variables simultanément.

II.4.b Méthode d'optimisation aléatoire

Le temps nécessaire pour réaliser une optimisation exhaustive n'étant pas toujours acceptable, une alternative consiste à réaliser une optimisation aléatoire au sein de l'espace des alternatives. Plus le nombre d'alternatives testées est important et plus les chances d'obtenir un grand choix de compromis Pareto-optimaux sont élevées.

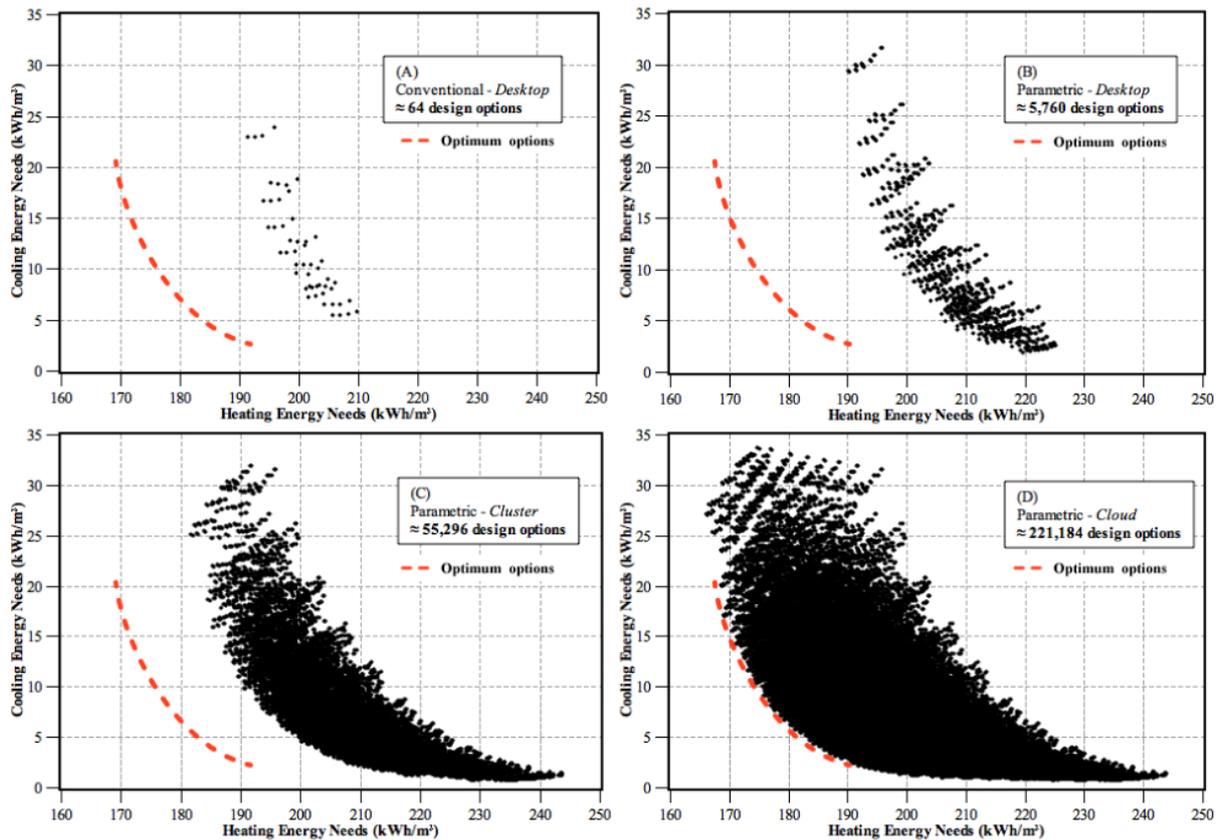


Figure 19 : Comparaison des résultats obtenus (précision et nombre de solutions) par la recherche itérative avec la recherche aléatoire réalisée sur une durée de 72h selon le nombre d'unités de calcul utilisé (Naboni et al. 2013)

Dans le cas où l'utilisation de modèles de calcul numériques induit des temps de calcul important pour une unité de calcul, une solution consiste à distribuer les calculs sur plusieurs unités de calcul. Afin de minimiser simultanément les besoins de chauffage et de rafraîchissement, Naboni et al. (2013) ont comparé les résultats obtenus par des itérations successives (une unité de calcul), par étude paramétrique (2 unités de calculs), par l'utilisation d'un réseau local (20 unités de calcul) et par l'utilisation de l'informatique en nuage (80 unités de calcul). Pour distribuer ces calculs, une plateforme de calcul paramétrique jEPlus associée au logiciel de simulation thermique dynamique EnergyPlus a été utilisée et couplée au serveur de calcul en nuage VENUS-C. Cela a permis le calcul de 221 184 alternatives en moins de 72h¹⁷ contre 64 alternatives par itérations successives. Les meilleures solutions obtenues par

¹⁷ L'infrastructure était constituée de 12 Intel Xeon X5650 Six Cœurs avec des processeurs de 2.6GHz, 24GB de mémoire et 2TB de stockage et de 16 AMD Opteron 6140 Huit Cœurs avec des processeurs de 2.6GHz, 32GB de mémoire et 2TB de stockage.

l'informatique en nuage permettent également un gain énergétique de 33% par rapport à la meilleure solution obtenue par des itérations successives et s'approchent du front de Pareto (Figure 19).

II.4.c Méthodes d'optimisation approchées

L'optimisation aléatoire nécessite un grand nombre d'évaluations pour obtenir de nombreuses solutions proches des compromis Pareto-optimums globaux. Afin de limiter le nombre d'évaluations des fonctions-objectif dans la recherche des solutions non-dominées, d'autres méthodes d'optimisation peuvent être utilisées. La finalité des méthodes d'optimisation approchées est de trouver dans le domaine de conception le ou les compromis Pareto-optimums globaux sans évaluer l'intégralité des solutions. Le choix d'un algorithme d'optimisation n'est pas trivial et dépend des caractéristiques du problème à optimiser (Nguyen et al. 2014) :

- la nature des variables de décision : continues, discrètes ou mixtes ;
- la présence de contraintes sur les fonctions-objectif ;
- le nombre et la nature des fonctions-objectif (linéarité, continuité, convexité, existence de minimums locaux...) ;
- la dérivabilité des fonctions-objectif ;
- le contexte du problème (statique ou dynamique, etc.).

Trois catégories de méthodes d'optimisation approchées se distinguent : les méthodes déterministes, les heuristiques spécialisées et les métaheuristiques. Les méthodes heuristiques sont des méthodes d'optimisation développées pour résoudre un seul et unique type de problème (Colette and Siarry 2002). Au contraire, les métaheuristiques peuvent s'adapter à différents types de problèmes. Le terme métaheuristique a été utilisé pour la première fois par Glover (1986) pour distinguer la méthode de recherche Tabou des heuristiques spécifiques. Compte tenu de leurs spécificités, les heuristiques spécialisées ne sont pas abordées dans la suite de cette section.

Les méthodes déterministes en optimisation de bâtiments

Les méthodes déterministes ne reposent pas sur un processus stochastique pour la recherche de l'optimum, mais sur la formulation mathématique des fonctions-objectif. Pour converger, ces méthodes requièrent des fonctions continues et dérivables (Wetter and Wright 2003; Wetter and Wright 2004). Elles sont donc rarement appropriées pour les problèmes d'optimisation de bâtiments qui sont généralement discontinus de par la nature des variables de décision dont certaines sont continues et d'autres discrètes. De plus, l'utilisation de modèles numériques en tant que boîte noire dans la formulation des fonctions-objectif induit une méconnaissance de leur nature et de leur dérivabilité.

Afin d'optimiser simultanément le confort thermique et les consommations énergétiques, Eisenhower et al. (2012) ont réalisé des métamodèles par la méthode de Machine à vecteurs de support (en anglais *Support Vector Machine*, SVM) à partir d'un modèle numérique de simulation thermique dynamique réalisé sous le logiciel EnergyPlus. L'usage de métamodèles

permet de réduire les temps de calcul (une fraction de seconde avec le métamodèle contre 15 minutes avec le modèle numérique sur un ordinateur personnel cadencé à 2.8 GHz) et d'obtenir des fonctions-objectif dérivables et continues. Le calcul de l'échantillon utilisé pour le calcul des métamodèles, composé de 5000 calculs, a été parallélisé sur une ferme de calcul constituée de 184 unités de calcul. Deux méthodes d'optimisation ont ensuite été utilisées : la méthode déterministe des points intérieurs et la méthode stochastique à recherche directe MADS (Mesh Adaptive Direct Search). Le nombre de calculs nécessaire à l'obtention d'une solution optimale a alors été comparé, avec un nombre maximal d'itérations fixé à 1 million. La solution obtenue après 1 million d'itérations par la méthode de recherche locale est dominée par la solution obtenue avec 40 000 itérations par la méthode déterministe.

Les métaheuristiques en optimisation de bâtiments

Les métaheuristiques, contrairement aux méthodes déterministes, ne nécessitent pas la continuité et dérivabilité des fonctions-objectif, ce sont des méthodes directes. Ces méthodes sont basées sur un processus stochastique. L'inconvénient majeur des méthodes stochastiques est leur non-garantie d'optimalité absolue pour un nombre de simulations limité (Evins 2013). La méthode d'optimisation sélectionnée doit néanmoins assurer l'obtention rapide d'un ensemble de solutions proches des optimums globaux.

Selon le «*no free lunch theorem*» (Wolpert and Macready 1997), une méthode stochastique ne peut pas être meilleure que les autres sur l'ensemble des problèmes d'optimisation qui existent. La recherche aléatoire est en moyenne plus performante. Bien choisie et paramétrée, une méthode stochastique peut néanmoins être plus efficace et robuste que la recherche aléatoire sur un type de problème donné. Une des méthodes efficaces de résolution de problème d'optimisation difficile est l'usage de métaheuristiques. Ce sont des stratégies permettant de guider la recherche d'une ou de plusieurs solutions optimales pouvant s'adapter à un problème complexe. Les métaheuristiques fonctionnent selon une structure de voisinage. L'exploration de l'espace des solutions évolue alors par itérations successives et par comparaison avec le voisinage, selon des règles propres à chaque métaheuristique. La recherche de l'optimum se termine lorsqu'un critère d'arrêt est atteint : il peut s'agir d'une durée d'exécution préalablement définie ou de l'obtention d'un niveau de précision requis.

D'une manière générale, trois notions sont essentielles à la compréhension des métaheuristiques :

- la diversification désigne l'étape visant à récolter de l'information sur le problème à optimiser par l'exploration de solutions de voisinage en voisinage ;
- l'intensification vise à utiliser l'information récoltée lors de la diversification en explorant des zones particulièrement intéressantes qui constituent des extrema ;
- la mémorisation de données qui guident la recherche de l'optimum. Elle évite ainsi les extrema locaux en orientant les solutions vers les zones où l'optimum global est susceptible de se trouver. L'algorithme ne tient alors compte que de ces zones.

Une grande partie des travaux d'optimisation de bâtiments utilisent des métaheuristiques (Evins 2013). Les exemples d'utilisation de métaheuristiques dans le domaine du bâtiment peuvent alors se classer selon deux grandes catégories.

- *Les méthodes de recherche locale ou méthodes de trajectoire*

Les méthodes de recherche locale sont des méthodes de trajectoire qui à chaque itération font éventuellement évoluer une solution de l'espace de recherche vers une meilleure solution. Pour éviter de tomber dans un minimum local, plusieurs méthodes différentes existent telles que le recuit simulé (Kirkpatrick et al. 1982; Černý 1985), la « recherche Tabou » (Glover 1986) et la recherche à voisinage variable (Mladenović and Hansen 1997). Le principe de fonctionnement de ces métaheuristiques et la recherche locale itérative élémentaire sont définis dans l'Annexe F.

Par exemple, Aparicio Ruiz et al. (2014) emploient un algorithme de « recherche Tabou » pour optimiser l'enveloppe d'un bâtiment résidentiel afin de minimiser le coût de cycle de vie du bâtiment qui comprend les coûts d'investissement, de consommations annuelles et des coûts liés aux émissions de CO₂. Les consommations de chauffage et de rafraîchissement ont été obtenues à partir de modèles simplifiés. 48 cas ont alors été étudiés pour l'obtention de la solution optimale ce qui a nécessité moins d'une minute de calcul¹⁸. Cette méthode de recherche locale utilise une liste Tabou pour éviter de rester coincée sur un minimum local. Durant l'optimisation, l'ensemble des solutions de voisinage d'une solution \vec{X} est évalué et la meilleure solution \vec{X}' est alors choisie même si elle dégrade la solution initiale. Pour éviter de retomber sur la solution initiale s , les dernières solutions visitées sont mémorisées dans la liste Tabou (une file FIFO) afin d'interdire tout déplacement vers une de ces solutions.

- *Les méthodes basées sur les populations*

Contrairement aux méthodes de recherche locale qui manipulent une seule solution à la fois, les méthodes basées sur les populations manipulent un ensemble de solutions en parallèle à chaque itération. Le principal avantage de ces méthodes est leur grande capacité d'exploration de l'espace des solutions et ainsi limiter les risques de tomber dans des minimums locaux.

¹⁸ Les calculs ont été réalisés sur un ordinateur Intel C2D E7400; 2.8 GHz; 4 GB RAM sous Windows 7

D'après une étude réalisée sur plus de 200 travaux, Nguyen et al. (2014) rapportent que les algorithmes stochastiques à population sont les méthodes les plus employées dans le domaine de l'optimisation de bâtiments performants (Figure 20). Parmi eux les algorithmes génétiques arrivent en première position suivie par l'optimisation par essaim particulaire inspirée des vols d'oiseaux (*cf.* Annexe F).

Par exemple, Chantrelle et al. (2011) utilisent un algorithme génétique évolué (NSGA-II pour *Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) qui est capable de réaliser des optimisations multiobjectifs en s'appuyant sur le principe de Pareto-optimalité et en tenant compte de variables discrètes et continues. Chantrelle et al. (2011) optimisent ainsi la réhabilitation de bâtiments à partir de fonctions-objectif relatives au confort thermique estival, au coût d'investissement, aux consommations énergétiques et au potentiel de réchauffement climatique. Les variables considérées concernent des scénarios de réhabilitation portant sur la composition de l'enveloppe du bâtiment et la gestion des équipements. Hamdy (2012) cherche à améliorer les performances de cet algorithme (vitesse de convergence et qualité des solutions) pour l'optimisation de l'enveloppe et des systèmes énergétiques d'un bâtiment. Sur un cas d'étude simple, il compare notamment différents paramétrages de NSGA-II avec une recherche exhaustive et un nouvel algorithme génétique (PR-GA). La nouvelle méthode proposée (PR-GA) permet alors d'obtenir un meilleur ensemble de solutions optimales en réduisant la durée d'optimisation de plus de 50% par rapport à la version initiale des NSGA-II quel que soit le paramétrage considéré. Ainsi, Le potentiel de réchauffement climatique et les coûts d'investissement ont été minimisés pour un logement de deux niveaux. L'une des solutions résultantes de l'optimisation a permis de diminuer de 26% le potentiel de réchauffement climatique et de 32% les coûts d'investissement par rapport au cas de référence considéré.

Les algorithmes par essaim particulaire ont été utilisés dans divers problèmes d'optimisation de bâtiment. Kusiak et al. (2011) optimisent la consommation du système énergétique CVC d'un bâtiment tertiaire à l'aide d'un algorithme d'optimisation hybride basé sur les algorithmes évolutionnaires et l'optimisation par essaim particulaire. Yang et Wang (2012) utilisent un algorithme d'optimisation multiobjectif par essaim particulaire (MOPSO pour *MultiObjective Particle Swarm Optimisation*) pour optimiser la consommation énergétique et le confort thermique d'un bâtiment en faisant varier le système de contrôle de l'ambiance thermique du bâtiment telle que la température de consigne. Rapone et Saro (2012) optimisent le potentiel de réchauffement climatique sur le cycle de vie d'un bâtiment en utilisant également un algorithme d'optimisation par essaim particulaire. Des variables discrètes et continues relatives à la composition, dimension et protection des baies vitrées ont été considérées.

Enfin, un algorithme d'optimisation multiobjectif par colonie de fourmis (MACO pour *Multiobjective Ant Colony Optimisation*) a été utilisé pour l'optimisation combinatoire d'une façade modulaire de bâtiment par Shea et al. (2006) pour l'optimisation simultanée du confort visuel et des coûts d'investissement (*cf.* Annexe F).

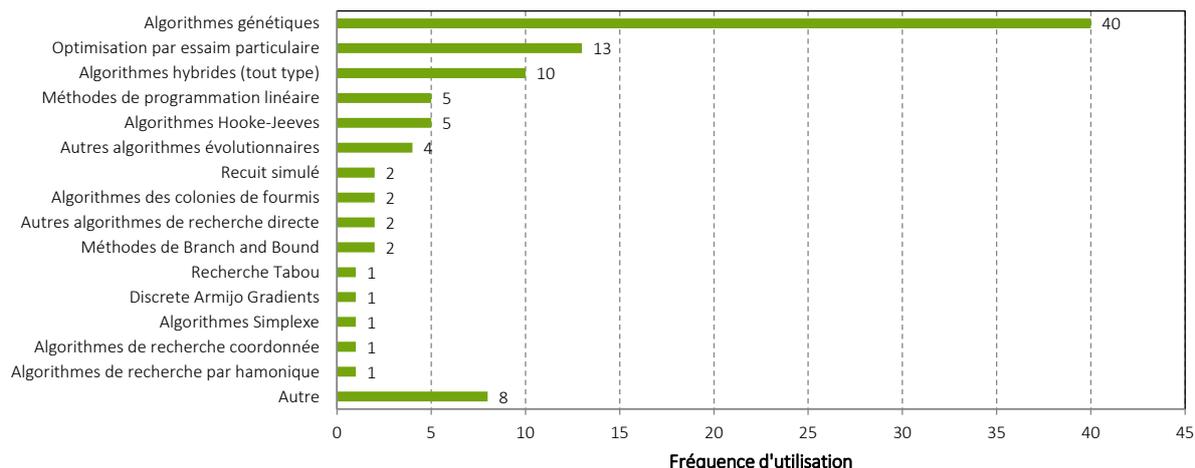


Figure 20 : Fréquence d'utilisation des différents algorithmes d'optimisation sur plus de 200 travaux dans le domaine de l'optimisation du bâtiment d'après (Nguyen et al. 2014)

II.4.d Extension à l'optimisation multiobjectif avec front de Pareto

L'obtention d'un front de Pareto avec les méthodes d'optimisation peut s'opérer soit en traitant le problème multiobjectif de manière vectorielle, c'est-à-dire sans effectuer l'agrégation des fonctions-objectif soit par agrégation, en se ramenant à une seule fonction-objectif et en réalisant des répétitions successives.

Méthodes d'optimisation multiobjectif vectorielle

Les méthodes les plus couramment employées pour l'optimisation multiobjectif vectorielle sont les métaheuristiques basées sur les populations. De par leur traitement simultané d'une population d'instances de solutions, ce type de méthodes se prête bien à la recherche d'un ensemble de solutions optimales. Ces méthodes de traitement multiobjectif sont généralement des méthodes couplées ou « imbriquées » dans la méthode d'optimisation (Colette and Siarry 2002). La méthode de traitement multiobjectif de la méthode multiobjectif en question peut difficilement s'appliquer sur une autre méthode d'optimisation. Des exemples de ces méthodes appliquées à l'optimisation multiobjectif du bâtiment sont l'algorithme NSGA-II utilisé par Chantrelle et al. (2011); Hamdy (2012); Rivallain (2013) et Gossard et al. (2013), la méthode du MOPSO employée par Yang et Wang (2012) ou encore la méthode MACO adoptée par Shea et al. (2006).

La méthode d'optimisation exacte par énumération exhaustive et la méthode aléatoire ne nécessitent pas non plus l'agrégation des fonctions-objectif. Le traitement multiobjectif vectoriel peut se faire directement après le calcul des alternatives.

Méthode d'optimisation multiobjectif par agrégation

Ces méthodes sont complètement découplées de la méthode d'optimisation (Colette and Siarry 2002). Elles ne nécessitent donc pas de méthode d'optimisation dédiée pour la recherche de solutions et peuvent donc être appliquées à n'importe quelle méthode d'optimisation.

- *Méthode sous contraintes variables ou méthode du compromis*

Dans cette méthode d'optimisation multiobjectif, l'un des objectifs, désigné comme étant prioritaire, est optimisé alors que les autres objectifs sont ramenés à des contraintes seuils, ε_i , qui varient au cours de répétitions successives de l'optimisation (Sharafi and ELMekkawy 2014). Également nommée ε -contrainte, cette méthode permet de rapporter le problème multiobjectif à un problème mono-objectif à contraintes variables. L'optimisation sous contraintes variables permet donc le recours à n'importe quelle méthode d'optimisation mono-objectif. Elle a aussi l'avantage de conduire à un ensemble de solutions optimales au sens de Pareto parmi lesquelles un choix pourra être fait. Néanmoins le nombre de solutions optimales trouvées est intrinsèquement lié au nombre de répétitions de l'optimisation. Pour limiter ce nombre de répétitions les valeurs seuils doivent être correctement établies selon la connaissance du problème à optimiser qui dépend du niveau d'expertise du concepteur.

Antipova et al. (2014) optimisent l'impact environnemental de la rénovation d'un bâtiment en fixant des seuils économiques variables. Différents types de vitrages, de murs, d'isolation de toiture et de panneaux solaires ont été considérés. L'optimisation permet de réduire le potentiel de réchauffement climatique de plus de 10% par rapport au cas de référence. Les auteurs précisent que les impacts environnementaux (acidification, toxicité humaine, eutrophisation, etc.) ne sont pas contradictoires et que le fait de ne minimiser que le potentiel de réchauffement climatique conduit à la minimisation tous les autres. Les fronts de Pareto obtenus pour chacun des impacts environnementaux considérés sont représentés dans la Figure 21. Seuls 10 compromis Pareto-optimaux ont alors été obtenus entre l'impact environnemental et le coût économique de la rénovation du bâtiment, ce qui correspond au nombre de répétitions réalisées.

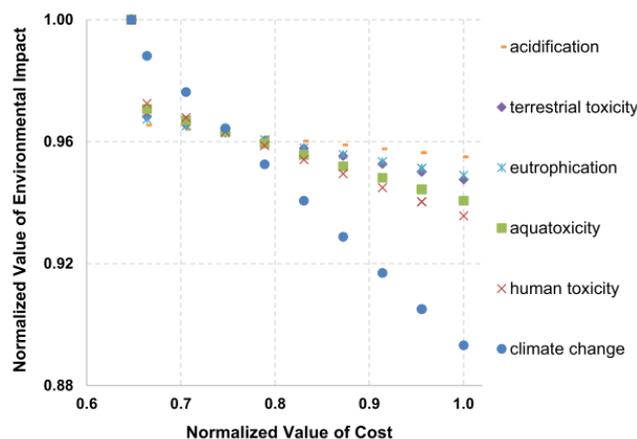


Figure 21 : Illustration représentant les fronts de Pareto obtenus par Antipova et al. (2014) pour chacun des impacts environnementaux considérés en optimisant le potentiel de réchauffement climatique sous contrainte économique variable

- *Méthode de pondération variable des fonctions-objectif*

Il s'agit de la même méthode abordée dans la section III.3.a, mais pour laquelle les pondérations sont variables au cours de répétitions successives de l'optimisation. Cette méthode est donc très proche de la précédente et possède les mêmes avantages et inconvénients.

II.5. Synthèse et méthodologie de conception adoptée

La conception multicritère d'un bâtiment est un problème d'optimisation multiobjectif dont les objectifs à optimiser sont parfois contradictoires (*cf.* section II.1.). Plusieurs objets sont ainsi étudiés dans la littérature tels que l'enveloppe, les systèmes énergétiques, la structure porteuse allant jusqu'à des études holistiques du bâtiment que ce soit en construction neuve ou rénovation (*cf.* section II.2.). Les objectifs le plus souvent abordés concernent la minimisation des consommations énergétiques et des coûts financiers engendrés par les différentes phases de vie du bâtiment. D'autres objectifs fréquemment fixés sont la minimisation de l'inconfort thermique, du potentiel de réchauffement climatique et, dans les cas d'études de structures porteuses, du poids de la structure. Des objectifs relatifs aux performances mécaniques ou environnementales, autres que le potentiel de réchauffement climatique, sont plus rarement employés. Enfin, l'association de l'optimisation énergétique d'un bâtiment avec l'optimisation de structure porteuse est rare. Seuls deux travaux traitant à la fois de disciplines de thermique et mécanique ont été référencés (Flager et al. 2009; Quaglia et al. 2014).

Selon le nombre et les différents types de variables de décision, le problème d'optimisation peut vite devenir un problème complexe dont l'espace des solutions est de très grande dimension. La conception consiste alors à rechercher et choisir la meilleure solution qui réponde à un contexte donné. Deux étapes sont nécessaires : une étape d'optimisation et une étape de prise de décision (*cf.* section II.3.). Ces étapes peuvent s'agencer de plusieurs façons ce qui engendrera des contraintes différentes concernant le choix et l'utilisation des méthodes d'optimisation et d'aide à la décision.

Dans la méthode où l'optimisation multiobjectif suit l'analyse multicritère, l'agrégation des fonctions-objectif en une seule fonction-objectif nécessite des niveaux d'expertise et de connaissance du problème à optimiser difficilement accessibles. D'autre part, le fait qu'une solution unique soit obtenue à l'issue du processus ne permet ni d'observer l'impact d'un objectif sur un autre objectif ni celui des variables de conceptions sur les objectifs. Lorsque le décideur souhaite analyser un ensemble de solutions optimales pour accroître sa connaissance et conforter sa décision, cette méthode est donc à proscrire.

Cherchant à présenter une grande diversité d'alternatives, l'approche retenue dans les travaux de ce mémoire doit permettre de proposer un ensemble de solutions optimales au sens de Pareto parmi lesquelles le ou les décideurs pourront choisir, dans un contexte donné, la solution souhaitée. Le processus de recherche doit donc précéder le processus de décision et mener vers un ensemble de solutions optimales, constituant un front de Pareto. La méthode avec prise de décision progressive n'est pas retenue en raison de son inconvénient principal qui est la nécessité de présence permanente du décideur durant l'optimisation.

La dimension de l'espace des solutions dépend du nombre de variables considérées et sa taille dépend des tailles des domaines de validité des variables. La cardinalité de cet espace peut rapidement atteindre plusieurs millions ou dizaines de millions de solutions (Rivallain 2013). De

plus, dans l'optimisation de bâtiments durables certaines fonctions-objectif peuvent avoir recours à des modèles numériques comme par exemple des modèles de simulation thermique dynamique pour la détermination des consommations énergétiques ou bien l'évaluation du confort thermique. Ces modèles numériques nécessitent d'une dizaine de secondes à quelques minutes voire quelques heures de temps de calcul. Des stratégies permettant d'améliorer la rapidité du calcul sont alors nécessaires (section II.4.). Ces stratégies peuvent impliquer une distribution des calculs sur plusieurs machines, la construction de métamodèles des modèles numériques ou toute autre technique permettant de réduire le temps de calcul sans perte significative de précision. Des méthodes d'optimisation approchées peuvent également être utilisées. Ces méthodes permettent d'explorer l'espace des solutions par itérations successives sans toutefois garantir l'obtention de la totalité des solutions optimales.

Dans le but d'alléger les ressources informatiques nécessaires aux projets de construction susceptibles d'employer la méthodologie développée dans ces travaux, l'usage de fermes de calcul n'a pas été retenu. Les méthodes d'optimisation exacte par énumération exhaustive et d'optimisation aléatoire sont donc ici proscrites et l'efficacité des méthodes d'optimisation approchées est privilégiée. Bien que l'usage de telles méthodes vise une optimisation efficace, les temps de calcul nécessaires à l'évaluation de fonctions-objectif issues de modèles numériques peuvent s'avérer conséquents et alourdir les temps d'optimisation (Rivallain 2013). La construction de métamodèles sera donc employée pour les fonctions-objectif ayant recours à des modèles numériques détaillés.

Enfin, pour limiter le niveau d'expertise requis durant l'optimisation et favoriser une grande diversité de solutions sur le front de Pareto, la catégorie des méthodes d'optimisation multiobjectif vectorielle appelée dans la littérature « *true optimisation* » ou « *Pareto optimisation* » est choisie dans ces travaux. Le choix de la méthode d'optimisation s'oriente donc *a priori* vers une métaheuristique à population. Ce choix nécessite de déterminer les spécificités du problème à optimiser et donc de l'avoir formulé au préalable. La méthode d'optimisation employée dans ces travaux sera donc adoptée dans le Chapitre V. qui porte sur la « Mise en œuvre de la méthode d'optimisation multiobjectif ».

Au regard des choix effectués, la méthodologie adoptée est alors composée d'un ensemble d'étapes nécessaires à la résolution des problèmes d'optimisation multiobjectif et de décision multicritère présentées dans la Figure 22. Cette méthodologie peut non seulement s'appliquer à l'optimisation du système constructif bois, objet des travaux de ce manuscrit, mais également être étendue à d'autres composants du bâtiment. Elle se définit comme suit.

Étape 1- Optimisation multiobjectif (processus de recherche)

La première étape de la démarche consiste à optimiser un bâtiment selon plusieurs objectifs initialement choisis. Il s'agit d'obtenir un ensemble de solutions optimales (un front de Pareto) dans un espace des solutions potentiellement contraint.

- *Choix des objectifs pertinents*

Dans un premier temps, les objectifs propres au projet et qui sont technologiques (ex. : confort thermique), sociaux et environnementaux (ex. : énergie grise) sont choisis. Le cahier des charges exprimé dans le programme a donc une forte influence sur ce choix.

- *Identification des variables significatives*

Les variables de conception significatives sont ensuite sélectionnées. Plusieurs modes de sélections peuvent être employés : par la théorie, par l'analyse de sensibilité et/ou par l'expertise pour les données manquantes.

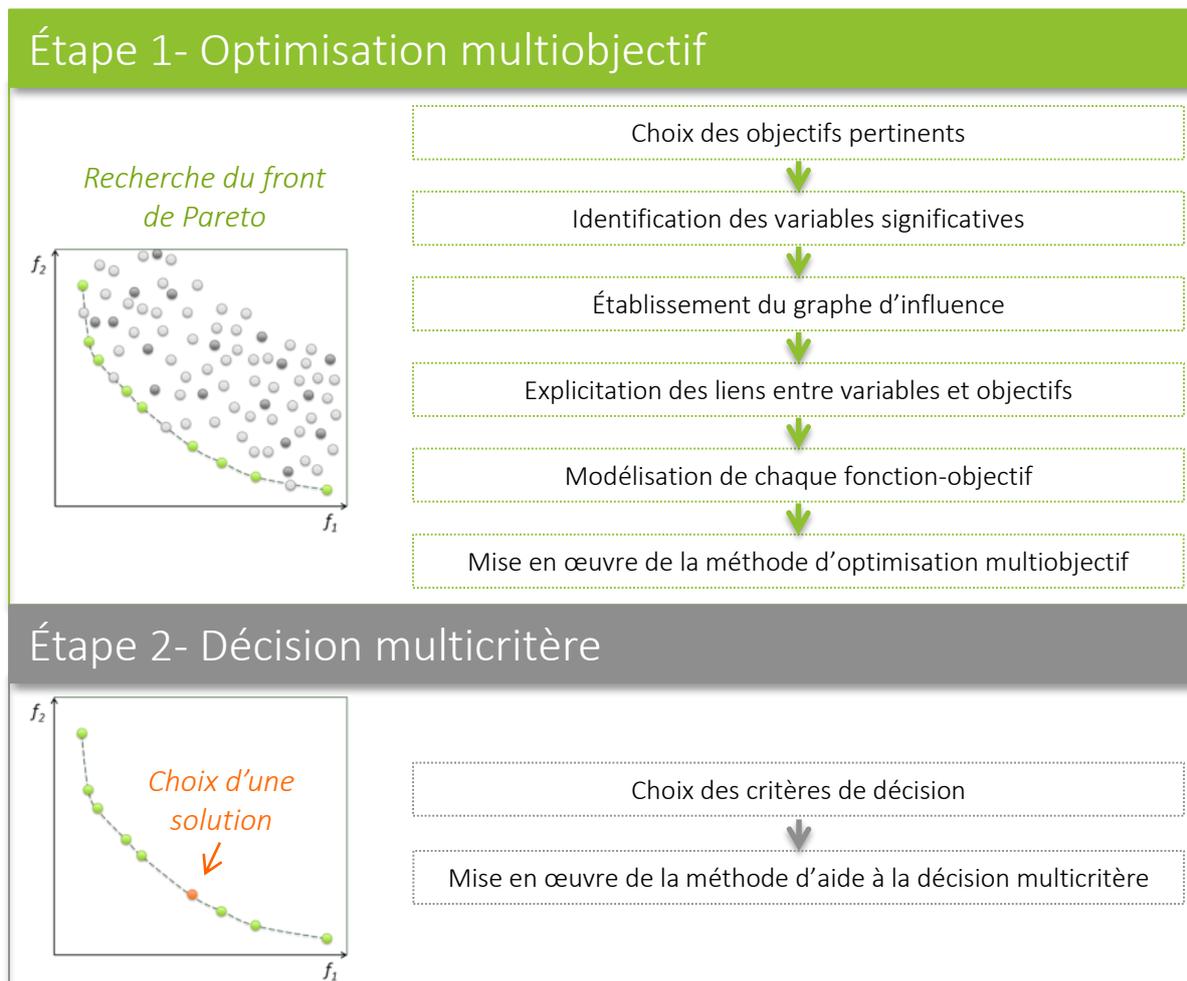


Figure 22 : Méthodologie de conception : une première phase d'optimisation multiobjectif suivi d'une phase de décision multicritère

- *Établissement du graphe d'influence*

Il s'agit d'établir un graphe d'influence représentatif des liens entre les objectifs choisis et les variables significatives identifiées. Il permet notamment de visualiser sur un même graphe l'ensemble des liens d'influence entre les variables et les objectifs et ainsi faire apparaître les

variables communes à plusieurs objectifs. Ce graphe permet alors d'identifier les objectifs contradictoires selon les variables communes à plusieurs objectifs.

- *Explicitation des liens entre variables et objectifs*

Les connaissances sont assemblées afin de faire le point sur le savoir disponible, puis des actions de recherches sont réalisées pour expliciter les relations non-connues entre les variables et les objectifs. Pour des objectifs de thermique, la saisie d'un bâtiment dans un logiciel de simulation thermique dynamique permet par exemple d'explicitier les relations entre variables et objectifs au moyen d'un modèle numérique. Si les modèles de simulation correspondants n'existent pas, il est alors nécessaire de les développer.

- *Modélisation de chaque fonction-objectif*

Chaque fonction-objectif est modélisée sous la forme d'une fonction explicite ou qualitative ou d'un algorithme calculable afin de pouvoir être minimisée ou maximisée.

- *Mise en œuvre de la méthode d'optimisation multiobjectif*

Il s'agit de choisir la méthode d'optimisation multiobjectif adaptée à la diversité des fonctions-objectif et à l'hétérogénéité des variables. Elle devra ensuite être mise en œuvre et paramétrée. La méthode choisie doit permettre une recherche efficace du front de Pareto. Les méthodes d'optimisation stochastiques et plus particulièrement les métaheuristiques à population sont alors privilégiées (cf. Chapitre V.).

Étape 2- Décision multicritère (processus de décision)

C'est la deuxième étape de la démarche. Il s'agit de choisir, parmi l'ensemble de solutions optimales précédemment obtenu une solution optimale adaptée à un contexte donné selon des critères fixés.

- *Choix des critères de décision*

Des critères d'évaluation économiques, de préférence et de savoir-faire (faisabilité industrielle) sont choisis.

- *Mise en place de la méthode d'aide à la décision multicritère*

Une méthode d'aide à la décision est choisie en fonction de la nature et du type de chacun des critères choisis puis mise en œuvre. Elle devra être adaptée au type de sortie souhaité (classement, catégorisation...).

Des travaux ont déjà abordé l'aide à la décision multicritère visant le choix de systèmes constructifs bois (Mussier 1998; Frenette 2009). Toutefois aucun travail visant l'optimisation multiobjectif de ces systèmes n'a été recensé. La suite de ces travaux et de ce manuscrit se focalise donc uniquement sur l'optimisation multiobjectif de systèmes constructifs bois.

Chapitre III. Choix des objectifs pertinents et sélection des variables significatives

Dans ce chapitre, il s'agit de choisir des objectifs pertinents et de sélectionner des variables significatives pour l'optimisation multiobjectif d'un système constructif bois pour des bâtiments multiétages.

Dans le chapitre précédent il a été vu que de nombreux objets d'études du bâtiment (enveloppe, systèmes énergétiques, structure porteuse...) peuvent nécessiter la résolution d'un problème d'optimisation multiobjectif. Dans une première section, l'objet d'étude de ces travaux de thèse portant sur le système constructif bois de bâtiments multiétages est défini. Le positionnement de cette étude dans le processus de conception d'un bâtiment est également précisé. Les fonctions d'usage auxquelles un bâtiment doit répondre sont ensuite précisées et des indicateurs de performance sont proposés.

Un cas d'étude correspondant à un bâtiment de logement collectif et sur lequel la méthodologie développée sera appliquée est alors décrit. À partir des indicateurs de performances identifiés et du cas d'étude, des objectifs à optimiser sont choisis.

La sélection des variables significatives s'appuie sur le positionnement de la conception en phase d'avant-projet définitif (APD). Certains paramètres sont alors fixés et des variables de décisions sont sélectionnées. Afin de consolider la sélection de variables significatives, des analyses de sensibilité sont réalisées sur les objectifs de thermique. Par la suite, les variables peu influentes sont fixées.

Pour finir, un graphe d'influence est établi permettant alors de représenter les liens entre les objectifs choisis et les variables significatives identifiées.

III.1. Processus de conception d'un bâtiment

III.1.a Le bâtiment, un système constructif complexe

Un système constructif est un « ensemble cohérent de composants industrialisés » (Larousse 2015). Gobin (2003) décrit le bâtiment comme l'agencement de six sous-ensembles fonctionnels définis dans la Figure 23. Le bâtiment est donc un système constructif complexe où la plupart des composants ne peuvent être étudiés indépendamment les uns des autres. Plus spécifiquement, dans la construction bois, la conception de l'enveloppe (ensemble des éléments séparatifs du milieu extérieur) est difficilement dissociable de celle de la structure (ensemble des éléments porteurs du bâtiment). C'est par exemple le cas des murs à ossature bois où les vides entre les composants de la structure sont comblés par des composants de l'enveloppe pour séparer les zones d'activités du bâtiment du milieu extérieur. De même, dans des murs employant des panneaux de bois lamellés croisés, le CLT est à la fois un composant de l'enveloppe et de la structure. À l'échelle de l'utilisateur la conception des parois internes qui constituent les partitions est également difficilement dissociable de celle de la structure et de l'enveloppe : les partitions permettent de délimiter les zones d'activités¹⁹ et peuvent aussi être dotées d'un rôle porteur.

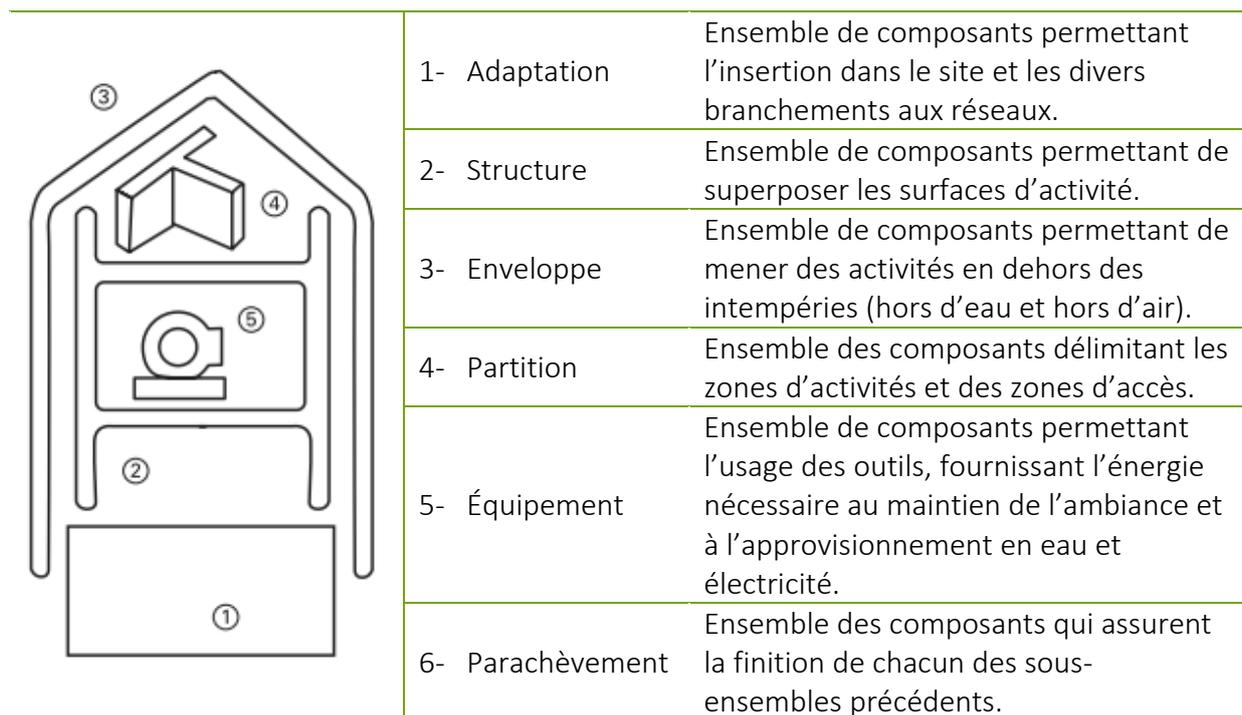


Figure 23 : Décomposition d'une construction en six sous-ensembles constitutifs (Gobin 2003)

¹⁹ En thermique on parle de volumes ou zones chauffés par opposition aux volumes non chauffés.

Par ailleurs, le dimensionnement des équipements de chauffage ventilation et climatisation (CVC) dépend généralement de la conception de la structure et de l'enveloppe du bâtiment. À l'inverse, il est plutôt rare de dimensionner la structure et l'enveloppe en fonction d'un système CVC donné. Dans le cadre du travail présenté dans ce mémoire, seuls les sous-ensembles de la **structure**, de l'**enveloppe** et des **partitions** seront étudiés. L'emploi du terme « **système constructif** » concerne donc ces trois sous-ensembles de composants.

III.1.b Le processus de conception de bâtiment

Un projet de construction passe par trois étapes principales : la programmation, la conception et la réalisation (Figure 24). La programmation est effectuée par la maîtrise d'ouvrage et consiste à mettre en place un cahier des charges. La maîtrise d'ouvrage doit alors formaliser l'expression des besoins ainsi que les normes métiers et les règles de qualité à respecter. Elle devra par la suite contrôler que les livrables remis par la maîtrise d'œuvre respectent ce cahier des charges. Lors de la phase de conception, le maître d'œuvre apporte une réponse architecturale, technique et économique au cahier des charges de la maîtrise d'ouvrage. Enfin, la réalisation consiste dans un temps imparti à exécuter la proposition du maître d'œuvre validée par le maître d'ouvrage. Lors d'un projet de construction, la maîtrise d'ouvrage peut se faire accompagner par autant d'assistants à maîtrise d'ouvrage que nécessaire selon les compétences requises (environnementales, fonctionnelles, économiques, etc.)

Les phasages d'un projet sont décrits dans les contrats de marchés publics régis par la loi MOP (Maîtrise d'Ouvrage Public), ou loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée. Cette loi met en place, pour les marchés publics, la relation entre maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre. D'autres formes de contrats existent, telles que les contrats de conception/construction, de partenariat, les contrats globaux, etc. Ces contrats suivent plus ou moins les mêmes phases, mais selon les cas, certaines phases se recoupent, les acteurs interviennent à des moments différents et leurs obligations varient.

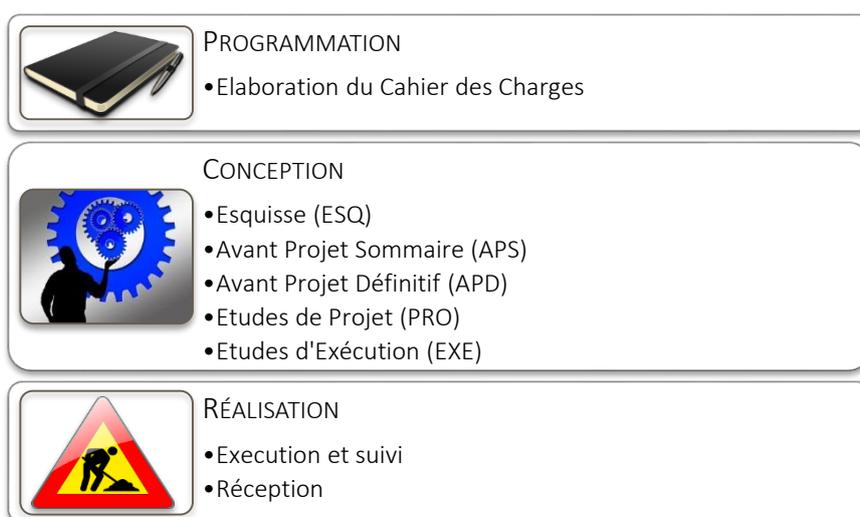


Figure 24 : Processus d'un projet de construction inspiré du décret n°93-1268

Dans le cas de la loi MOP, les missions de la maîtrise d'œuvre confiées par des maîtres d'ouvrage publics à des prestataires de droit privé répondent au Décret n° 93-1268 du 29 novembre 1993 (République française 1993). La conception doit répondre aux besoins, objectifs, contraintes et exigences exprimés dans le programme. Elle se décompose en plusieurs phases qui abordent des éléments techniques, organisationnels et économiques :

- **La phase esquisse (ESQ)** consiste à proposer une ou plusieurs solutions d'ensemble, traduisant les éléments majeurs du programme et à vérifier la faisabilité de l'opération au regard des différentes contraintes réglementaires, techniques, économiques et organisationnelles contenues dans le programme. Dès le début de la phase de conception, la phase esquisse permet de fixer à partir du programme un certain nombre de paramètres nécessaires à la conception du bâtiment. Ces paramètres peuvent être classés selon quatre catégories :
 - o Paramètres liés à la localisation du projet tels que :
 - les données climatiques : température, ensoleillement, vitesse et orientation du vent, pluviométrie et enneigement ;
 - l'altitude du site ;
 - la sismicité de la zone ;
 - la rugosité du terrain ;
 - la zone de bruit ;
 - la topographie du site.
 - o Paramètres d'usage tels que :
 - les charges d'exploitation ;
 - les scénarios d'occupation ;
 - le type d'activité ;
 - les consignes de température.
 - o Paramètres liés aux exigences réglementaires à respecter tels que :
 - la réglementation acoustique ;
 - la réglementation thermique (RT2012) ;
 - les Eurocodes.
 - o Paramètres liés à des spécificités souhaitées par le maître d'ouvrage tels que :
 - la réalisation d'un bâtiment à énergie positive (BePOS) ;
 - la réalisation d'un bâtiment certifié haute qualité environnementale (HQE) (CERTIVEA 2011) ;
 - la réalisation d'un bâtiment à faible émission de CO₂.
- **L'avant-projet sommaire (APS)** définit la composition générale en plan et volume, l'appréciation des volumes intérieurs et l'aspect extérieur de l'ouvrage. Des dispositions techniques envisageables sont proposées. Enfin, il consiste à préciser le calendrier et les coûts prévisionnels des travaux.
- **L'avant-projet définitif (APD)** consiste à déterminer les surfaces détaillées et à arrêter les dimensions de l'ouvrage et son aspect. C'est dans cette phase qu'intervient la définition des principes constructifs, de fondations et de structure, ainsi que leur dimensionnement indicatif. Sont également déterminés les matériaux, les installations techniques et les scénarios de fonctionnement envisagés. Enfin, les coûts prévisionnels des travaux sont fixés et décomposés en lots.

- **La phase projet (PRO)** finalise les études techniques et consiste à valider avec précision les hypothèses préalablement établies. Les plans, coupes et élévations, les formes des différents éléments de la construction, la nature et les caractéristiques des matériaux et les conditions de leur mise en œuvre sont alors précisés. L'implantation et l'encombrement de tous les éléments de structure et des équipements techniques ainsi que les tracés d'alimentations et d'évacuations sont détaillés. Les coûts prévisionnels de réalisation de l'ouvrage sont arrêtés et les coûts d'exploitation peuvent être estimés. Enfin, le délai global de réalisation de l'ouvrage est déterminé.
- **Les études d'exécution (EXE)** consistent à produire l'ensemble des plans nécessaires à la réalisation de l'ouvrage. Les coûts prévisionnels et les délais d'exécution sont mis à jour.

L'objet de ce travail porte sur la conception du système constructif qui intervient principalement en phase d'avant-projet définitif. La suite de ce manuscrit se positionne donc au niveau de la phase APD de la conception d'un bâtiment. De nombreux paramètres sont préalablement fixés et définissent une solution d'ensemble (Tableau 1). Cela comprend les principes d'architecture bioclimatique mis en place tels que l'orientation, l'utilisation d'une ventilation naturelle et l'utilisation de protections solaires. Le choix des systèmes constructifs porteurs est également préétabli dans les grandes lignes (usage de bois prédominant, désignation des murs porteurs, système de contreventement, etc.). Des paramètres liés aux aspects extérieurs et intérieurs peuvent encore varier comme la profondeur des protections solaires. Les autres paramètres du système constructif étudiés concernent le choix des matériaux, la dimension et l'agencement des éléments qui composent la paroi (ex. : épaisseur d'un isolant, type de plancher intermédiaire, etc.). Les dispositifs d'assemblage et de jonction des composants et l'intégration des réseaux peuvent être anticipés, mais ne sont pas considérés dans cette étude.

Tableau 1 : Paramètres du système constructif fixés et à étudier dans cette étude

PARAMETRES FIXES	PARAMETRES DU SYSTEME CONSTRUCTIF A ETUDIER DANS CETTE ETUDE	PARAMETRES A ETUDIER ULTERIEUREMENT
<ul style="list-style-type: none"> o Paramètre de localisation o Paramètres d'usage o Géométrie et volumétrie o Plans, surface et zones d'activité o Orientation o Principales protections solaires o Principes architecturaux et dispositions techniques o Choix du type de structure porteuse o Dimension des fenêtres et des ouvrants 	<ul style="list-style-type: none"> o Type de fenêtres : types de vitrages et de menuiseries o Matériaux des composants o Agencement des éléments qui composent les parois o Dimensions des éléments qui composent les parois o Dimensions des protections solaires 	<ul style="list-style-type: none"> o Dispositifs d'assemblage et de jonction des composants o Intégration des réseaux d'approvisionnement en eau, en électricité et de ventilation. o Choix et dimensionnement des équipements techniques de chauffage, de ventilation, de climatisation et d'éclairage.

III.2. Critères de performances et exigences pour la conception du système constructif

Le système constructif rend service à l'utilisateur et agit sur le milieu extérieur dans lequel la zone d'activité de l'utilisateur est implantée. Pour exprimer le besoin primaire auquel le système constructif doit répondre, il est nécessaire de répondre aux questions « *A qui ?* », « *Sur quoi ?* » et « *Dans quel but ?* ». La fonction principale du système constructif est d'isoler l'utilisateur et ses biens des diverses sollicitations du milieu extérieur (actions climatiques, d'environnement et d'individus). Ce besoin primaire est explicitement exprimé dans la Figure 25. Néanmoins, les fonctionnalités du système constructif ne se limitent pas à cette fonction principale.

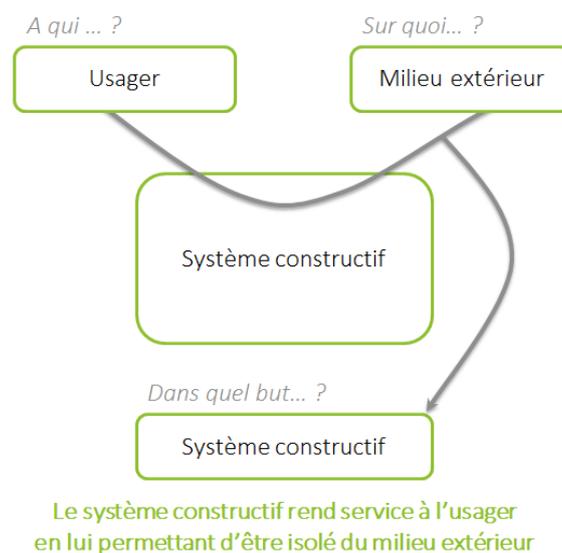


Figure 25 : Schéma du besoin primaire auquel doit répondre le système constructif

L'ensemble du processus de construction d'un bâtiment a pour finalité d'offrir les meilleures conditions pour mener à bien les activités de l'utilisateur. D'après Gobin, sept fonctions d'usages indispensables peuvent expliciter ces conditions²⁰ (Gobin 2003). Elles permettent d'accomplir un certain nombre de tâches en tenant compte des perturbations physiques extérieures (le climat, les intempéries, l'environnement) et sociales (les riverains, les autres usagers du bâtiment, les instances réglementaires). La conception d'un sous-ensemble ou composant du bâtiment nécessite de lister les performances attendues selon chacune des fonctions d'usage définies. Dans le cas du système constructif, les performances d'usage recherchées sont résumées dans le Tableau 2.

²⁰ En 1980, la Fédération française du bâtiment (FFB), le cabinet APTE (Application des Techniques d'Entreprise) et GTM Construction ont définis une formulation générique de ces fonctions d'usage.

Tableau 2 : Liste des performances du système constructif par fonction d'usage (d'après Gobin 2003)

Fournir les espaces pour mener des activités	<p><i>Service rendu par l'habitat qui permet à l'utilisateur de disposer d'espaces nécessaires pour accomplir différentes actions menées soit à l'intérieur du groupe familial, soit avec des personnes extérieures.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Dimension intérieure
Protéger les biens et outils ainsi que le groupe humain	<p><i>Service rendu par l'habitat qui permet à l'utilisateur de préserver (mais aussi d'utiliser) ses biens et ses outils malgré les diverses agressions climatiques, d'environnement ou d'actions volontaires d'autres personnes.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Dimensionnement de la structure <ul style="list-style-type: none"> - Résistance au vent - Résistance aux chocs - Résistance aux séismes - Résistance aux charges - Maîtrise du tassement et de la déformation de la structure ➤ Sécurité incendie <ul style="list-style-type: none"> - Résistance au feu - Réaction au feu ➤ Pérennité de l'ouvrage <ul style="list-style-type: none"> - Étanchéité à l'eau - Étanchéité à l'air - Durabilité face aux risques de condensation - Durabilité face aux sollicitations extérieures
Mettre à disposition les biens et outils	<p><i>Service rendu par l'habitat qui permet à l'utilisateur d'utiliser les outils nécessités par ses activités et de profiter de ses biens.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Intégration des réseaux
Fournir une ambiance	<p><i>Service rendu par l'habitat qui permet à l'utilisateur d'adapter l'ambiance intérieure en fonction de l'ambiance extérieure.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Performance de confort : <ul style="list-style-type: none"> - Acoustique - Visuel - Hygrothermique - Olfactif - Qualité de l'air - Vibration des planchers
Maîtriser les relations	<p><i>Service rendu par l'habitat qui permet à l'utilisateur de filtrer, d'empêcher ou de favoriser ses contacts avec les autres personnes de l'extérieur et avec les éléments naturels de son environnement.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Dimensionnement et choix des ouvrants et dormants
Interagir avec l'environnement	<p><i>Service rendu par l'habitat qui permet à l'utilisateur de vivre dans un site sans lui porter atteinte.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Impacts environnementaux ➤ Respect des gammes de parements acceptés
Fonction sémiologique	<p><i>Qualité du vécu de l'habitat par l'utilisateur. C'est donc ce qui fait la différence entre une somme aride de composants techniques et l'appropriation de l'habitat.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Type de revêtement (texture, couleur, etc.)

La caractérisation économique ne figure pas dans la liste des performances d'usage, car comme le souligne Gobin (Gobin 2003), la notion de coût n'a aucune existence physique. Néanmoins, elle correspond à un protocole qui se retrouve dans le choix des performances. De même, les capacités d'industrialisation, de transport et de montage du système constructif ne sont pas représentées, car ne font pas non plus partie des performances d'usage. Toutefois, tout comme la caractérisation économique, elles ont un rôle moteur dans le processus de conception. Des choix sont alors effectués selon les différentes performances d'usage, mais également selon la faisabilité industrielle et économique des solutions proposées.

III.2.a Critères de confort des usagers

Le système constructif joue un rôle moteur dans la gestion de cette ambiance. Bien conçu, il permet de protéger l'utilisateur en l'isolant du milieu extérieur tout en lui permettant de bénéficier de ses atouts.

Critères d'évaluation du confort hygrothermique

Le confort hygrothermique est primordial pour la santé et l'activité des personnes. Il dépend d'un ensemble de paramètres tels que la température radiante, la température de l'air ambiant, l'humidité, les mouvements d'air, le métabolisme et l'habillement. Pour atteindre un confort hygrothermique suffisant, la combinaison de ces paramètres doit se situer à l'intérieur des limites d'une « zone de confort ». Le système constructif, dont l'une des fonctions d'usage est de fournir une ambiance, est un élément indispensable à considérer pour obtenir des niveaux de confort hygrothermique élevés.

Le confort hygrothermique dépend de la conception du clos couvert, mais également de l'usage de systèmes énergétiques, de ventilation mécanique ou naturelle et des températures de consigne fixées. L'utilisation de l'inertie thermique d'un bâtiment est une stratégie qui couplée à une ventilation nocturne permet de réduire l'inconfort estival de manière passive (Shaviv et al. 2001; La Roche and Milne 2004; Di Perna et al. 2011; Armand-Decker et al. 2013). Dans les constructions bois, du fait de la légèreté de la structure, il est particulièrement délicat de maintenir un confort hygrothermique estival sans l'utilisation d'un système de rafraîchissement, par exemple avec un échangeur par matériau à changement de phase (Rouault et al. 2014). Pour relever ce challenge, les systèmes constructifs bois doivent alors être conçus en limitant les apports par rayonnement solaire, en améliorant leur capacité de stockage et en la couplant avec un rafraîchissement nocturne par ventilation naturelle (Armand-Decker et al. 2011b; Armand-Decker et al. 2013). Il est à noter que mal conçues les surfaces vitrées peuvent facilement être responsables des deux tiers des apports de chaleur en été et sont donc des composants essentiels à prendre en compte dans la conception des systèmes constructifs (Benoit and Paradis 2014).

Plusieurs méthodes d'évaluation du confort hygrothermique permettent de guider la conception. Elles peuvent être classées selon trois approches distinctes :

- *Approches du confort thermique basées uniquement sur la température opérative*

La température opérative ou température résultante sèche, est une expression permettant de considérer, dans un local, à la fois les échanges de chaleur par rayonnement et par convection entre le corps humain et l'ambiance et d'autres facteurs. Elle dépend de la température ambiante, de la température moyenne de rayonnement et de la vitesse relative de l'air du local.

La norme NF EN 15251 (AFNOR 2007a), relative aux critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments, propose deux méthodes d'évaluation à partir de la température opérative :

- **Pourcentage en dehors de la plage** : Elle consiste à calculer sur la durée d'occupation du bâtiment, le nombre ou le pourcentage d'heures où la température sort d'une plage spécifiée. Cette méthode est couramment utilisée dans des projets HQE.
- **Critère de degrés-heures (DH)** : La durée pendant laquelle la température opérative (T_o) sort de la zone spécifiée pendant les heures d'occupation (p_{occ}) est pondérée par un facteur fonction de l'écart de température par rapport aux limites de la plage ($T_{lim,max}$ et $T_{lim,min}$) (Figure 26). Il s'agit de l'accumulation horaire de l'écart de la température opérative par rapport à une température de référence (T_{lim}) minimum ou maximum (Équation [III.1]).

$$DH = \sum \left(\int_{p_{occ}} |T_o - T_{lim}| dt \right) \text{ si } T_o > T_{lim} = T_{lim,max} \text{ ou } T_o < T_{lim} = T_{lim,min} \quad [III.1]$$

Bien qu'ils évaluent le confort thermique uniquement par le biais de la température opérative, ces indicateurs ont l'avantage d'être très simples à déterminer à partir de logiciels de STD (Simulation Thermique Dynamique), pour lesquels la température opérative horaire est presque toujours une donnée de sortie disponible par zone thermique considérée. Mais comme le souligne (Théllier 1999), le confort thermique ne se limite pas à la température d'un local, mais comporte également une composante subjective qui dépend des préférences « *psycho-socioaffectives* » individuelles.

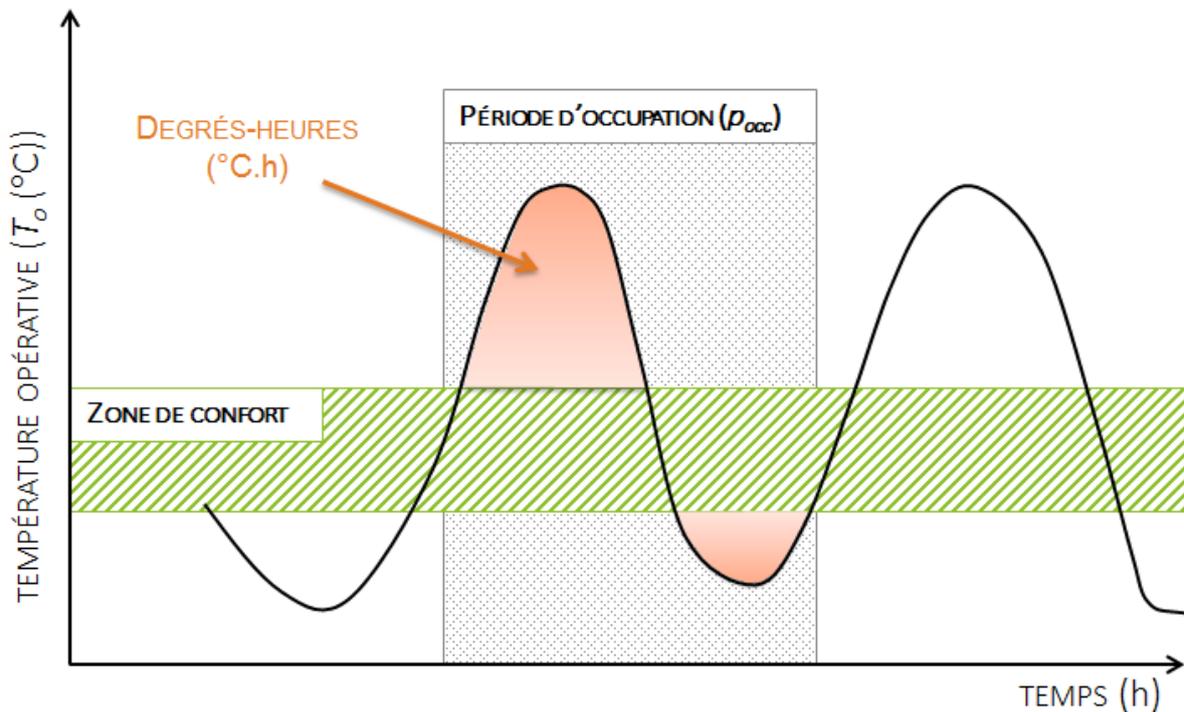


Figure 26 : Illustration du critère des degrés-heures appliqué à une zone de température opérative de confort

- *Approche analytique*

Les approches analytiques ont pour finalité de prévoir les réponses thermiques et physiologiques du corps humain en fonction des conditions environnementales. Comme pour les approches précédentes, elles permettent de déterminer les conditions de confort thermique par l'évaluation de paramètres caractéristiques de l'ambiance thermique, telle que la température opérative et tiennent plus finement compte de l'humidité relative intérieure, la vitesse de l'air, l'activité métabolique, l'isolement thermique vestimentaire, etc. Ces paramètres sont alors traduits sous la forme d'indices de confort spécifiques.

Le modèle analytique le plus utilisé et introduit dans de nombreux outils de STD (TRNSYS, EnergyPlus, etc.), repris dans la norme française NF EN ISO 7730 relative à l'ergonomie des ambiances thermiques (AFNOR 2005c), est le **modèle de Fanger** (Fanger 1970). Il permet de déterminer analytiquement et d'interpréter le confort thermique par le calcul de deux indices (PMV et PPD) et par des critères de confort thermique local. Basé sur un bilan thermique du corps humain vêtu, donc sur un modèle analytique, l'indice PMV (*Predicted Mean Vote*) prédit la valeur moyenne des votes d'un grand groupe de personnes selon une échelle de sensation thermique allant de -3 pour une sensation « très froid » à +3 pour une sensation « très chaud » (Équation [III.2]). Pour déterminer si l'ambiance thermique perçue est satisfaisante, une indication psychosociologique est ajoutée. L'indice PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) relié au PMV prédit quantitativement le pourcentage de personnes insatisfaites thermiquement, c'est-à-dire percevant une ambiance thermique trop chaude ou trop froide (Équation [III.3]).

$PMV = L \times [0,303 \times \exp(-0,036 \times H) + 0,028]$ <p>où :</p> <ul style="list-style-type: none"> - H est la production de chaleur du corps en W/m^2 ; - L est l'écart entre la production de chaleur interne du corps et la perte de chaleur dans l'environnement en W/m^2 . Cet écart se calcul en fonction du métabolisme, de l'habillement, de la température de l'air, de la température moyenne radiante, de la vitesse de l'air et de l'humidité relative. 	[III.2]
$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0,03353 \times PMV^4 - 0,2169 \times PMV^4)$	[III.3]

Selon la catégorie du bâtiment, la norme NF EN 15251 définit des seuils d'acceptabilité pour ces indices (AFNOR 2007a). Reprenant les méthodes d'évaluation basées sur la température opérative, il est alors possible de calculer deux indicateurs de performance :

- **Pourcentage en dehors de la plage** : La méthode consiste à calculer, sur la durée d'occupation du bâtiment, le nombre ou le pourcentage d'heures où le PMV sort d'une plage spécifiée.
- **Critères pondérés PPD (PPDP)** : La durée pendant laquelle le PMV réel sort de la plage de confort [$PMV_{lim,min}$; $PMV_{lim,max}$] est pondérée par un facteur fonction du PPD. À partir de la distribution du PMV sur l'année et de la relation entre le PMV et le PPD le critère suivant est calculé :

$PPDP = \sum \left(\int_{pocc} \frac{PPD(PMV)}{PPD(PMV_{lim})} dt \right)$ <p>si $PMV > PMV_{lim} = PMV_{lim,max}$ ou $PMV < PMV_{lim} = PMV_{lim,min}$.</p>	[III.4]
--	---------

Bien que complète, cette méthode possède certaines limites quant à son utilisation (Théllier 1999; Boulet 2009) :

- L'indice PMV a été établi en état thermique stationnaire et ne peut donc pas être appliqué lorsque des variables présentent des fluctuations rapides.
- Le PMV ne tient pas compte des zones d'inconfort locales.
- La détermination des indices PMV et PPD nécessite la prédiction délicate et imprécise de la vêtue et du niveau métabolique.
- L'indice PPD est déterminé à partir d'études statistiques se limitant à une population donnée.

Le modèle analytique de Fanger est adéquat pour des bâtiments climatisés, mais n'est pas fiable pour des bâtiments à ventilation naturelle avec une tendance à surestimer le niveau d'inconfort (Boulet 2009). Ce type d'indice implique donc le recours à la climatisation (principalement dans le tertiaire).

- *Approche adaptative*

Contrairement à la méthode analytique de Fanger qui base son approche sur un bilan thermique du corps humain, l'approche adaptative considère que l'utilisateur est un élément moteur à la gestion de son confort thermique. Il y a un certain nombre d'ajustements, conscient ou inconscient, qu'il doit et puisse effectuer pour atteindre un confort thermique adéquat (De Dear and Brager 1998; Théllier et al. 2007) :

- ajustement comportemental : par exemple le fait de retirer ou ajouter un vêtement ;
- ajustement de l'ambiance : ventilation par l'ouverture des fenêtres, mise en route d'un ventilateur, etc. ;
- ajustement physiologique : adaptation génétique ou acclimatation ;
- ajustement psychologique : relatif à l'expérience de l'individu.

Dans le cas de bâtiments non climatisés, la norme NF EN 15251 (AFNOR 2007a) définit ainsi une zone de confort adaptatif représentée en Figure 27. L'axe des abscisses correspond à la température extérieure en moyenne glissante journalière pondérée exponentiellement (Équation [III.5]). L'axe des ordonnées représente la température opérative intérieure. Pour être acceptable, la température opérative du bâtiment doit se situer dans la zone qui correspond à sa catégorie.

$$T_{rm} = (1-\alpha) \times \{T_{ed-1} + \alpha \times T_{ed-2} + \alpha^2 T_{ed-3} \dots\} \quad [III.5]$$

où :

- T_{rm} est la température moyenne glissante du jour ;
- T_{ed-i} est la température journalière extérieure du i -ème jour précédent ;
- α est une constante comprise entre 0 et 1. La norme recommande d'utiliser 0,8.

Afin de quantifier l'inconfort, il est alors possible de calculer le pourcentage de temps d'occupation ou le critère de degrés-heures où la température opérative n'est pas contenue dans cette zone (équation [III.1]).

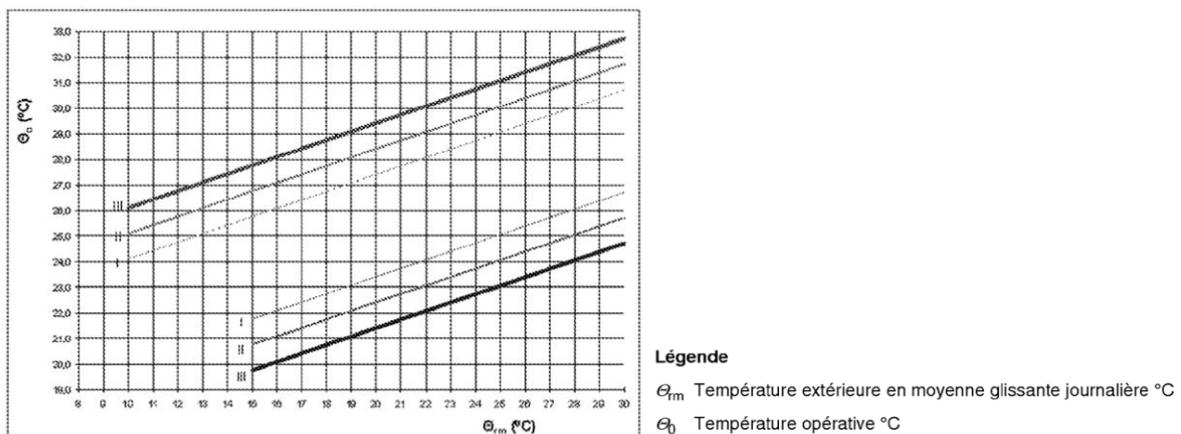


Figure 27 : Gamme de températures opératives acceptables pour des bâtiments naturellement ventilés

Critères d'évaluation du confort acoustique

Le confort acoustique, au même titre que le confort thermique est une performance essentielle à la fonction principale du système constructif qui doit permettre à l'utilisateur de s'isoler du milieu extérieur. La fonction du système constructif consiste alors à isoler l'utilisateur des bruits indésirables provenant du milieu extérieur. Ici, le milieu extérieur à l'utilisateur peut être désigné comme l'espace extérieur, mais également comme une autre zone d'activité mitoyenne.

Trois sources de bruits peuvent être perçues dans un bâtiment : les bruits aériens, les bruits de chocs et les bruits d'équipements. Ces deux dernières sources sont transmises par voie solidienne et sont ensuite transformées par déformation des parois, des tuyauteries puis rayonnées en sons aériens (Kouyoumji 2013). Dans un bâtiment, ces bruits ou sons se propagent de différentes manières :

- par transmissions directes au travers de la façade, d'une cloison séparative, de la toiture, du plancher, etc. ;
- par transmissions indirectes ou latérales au travers de parois différentes de la paroi séparative ;
- par transmissions parasites par certains points singuliers (boîtier électrique, gaine technique, entrée d'air, coffre de volet roulant, défauts d'étanchéité à l'air, etc.).

L'isolation acoustique vis-à-vis des bruits aériens a pour but d'affaiblir la transmission directe entre le milieu extérieur et le local d'activité et de restreindre la propagation d'une pièce à une autre. L'isolation acoustique vis-à-vis des bruits solidiens vise à atténuer le rayonnement des bruits de choc dans les structures. À l'échelle de la paroi, avoir la meilleure performance acoustique possible revient donc à maximiser l'indice d'affaiblissement R_w (bruits aériens) et l'indice de réduction du niveau de bruit de choc L_w (bruits d'impact), pour un plancher. Ces indices sont exprimés en dB. À l'échelle du bâtiment, tous les chemins de transmission du bruit sont pris en compte. La grandeur utilisée est donc l'isolement normalisé D_n entre deux pièces.

Pour isoler les zones d'activité des bruits aériens, le concepteur effectue généralement un choix entre un système basé sur « la loi de masse », où la masse surfacique des parois va impacter le R_w et un système basé sur le principe « masse-ressort-masse » qui permet d'affaiblir la fréquence de résonance. Le dimensionnement et la continuité de ces éléments sont prépondérants au bon fonctionnement de ce principe (Boulet 2009).

La Nouvelle Réglementation Acoustique (NRA) française impose des exigences acoustiques à atteindre en matière de performances de l'ouvrage in situ : des indices uniques sont utilisés pour évaluer la performance acoustique à la fois des produits et ouvrages (mesures en laboratoire) et des bâtiments (mesures in situ). Selon le local d'émission et le local de réception des valeurs seuils sont alors fixées. Les indicateurs sont les suivants :

- $D_{nT,A}$: Isolement acoustique standardisé pondéré pour les bruits aériens intérieurs, exprimés en dB ;
- $D_{nT,A,tr}$: Isolement acoustique standardisé pondéré pour les bruits aériens extérieurs, exprimés en dB ;
- $L'_{nT,w}$: Niveau de pression pondéré des bruits de choc, standardisé, exprimé en dB.

En phase de conception, pour calculer l'isolement acoustique standardisé il est nécessaire de disposer de l'indice d'affaiblissement acoustique de chacun des éléments de la paroi tels que le mur, la fenêtre ou encore une entrée d'air. Dans la construction bois le problème demeure dans le manque de données pour l'indice d'affaiblissement acoustique des parois, mais également pour l'indice de réduction du niveau de bruit de choc. Leur détermination ne peut se faire que par essais ou analogie, car il n'existe pas de modèle mathématique suffisamment détaillé qui permette de faire des calculs acoustiques précis. Le projet Acoubois, visant à pallier ce manque, a établi une banque de données de solutions évaluées et a proposé une méthode simplifiée pour l'évaluation des performances acoustiques des parois et des bâtiments bois (Balanant et al. 2014). Cette méthode comporte deux étapes: la première consiste à évaluer les performances acoustiques des séparatifs et la deuxième à évaluer les performances acoustiques in situ d'un bâtiment. Néanmoins, les conclusions du rapport final soulignent que la prédiction des performances des séparatifs à ossatures est délicate et que la prédiction de la performance reste difficile pour un ouvrage léger.

Critères d'évaluation du confort visuel et accès à l'éclairage naturel

D'après le référentiel pour la qualité environnementale des bâtiments (CERTIVEA 2011), le confort visuel consiste d'une part à voir facilement les objets sans être ébloui, et d'autre part à avoir une ambiance lumineuse satisfaisante quantitativement en matière d'éclairage et d'équilibre des luminances, et qualitativement en matière de couleurs. Il est communément accepté que, correctement employée, la lumière naturelle ait des effets positifs, physiologiquement et psychologiquement. Il s'agit alors de profiter de façon optimale de l'agrément de la lumière naturelle tout en évitant ses inconvénients (éblouissement). La conception du système constructif impacte cet équilibre : les dimensions des parties vitrées et des protections solaires, les revêtements intérieurs et les caractéristiques intrinsèques de ces composants influencent la quantité et la qualité de l'éclairage naturel. Plusieurs indicateurs existent pour évaluer l'impact du système constructif sur le confort visuel :

- **Le Facteur de Lumière du Jour (FLJ)** (AFNOR 2007a) : c'est l'indicateur le plus couramment employé qui représente le facteur de l'éclairage naturel extérieur reçu en un point donné. C'est un indicateur statique basé sur un ciel couvert. Un facteur FLJ élevé indique une pénétration de la lumière naturelle élevée dans la zone d'activité. Cet indicateur ne permet pas de tenir compte de l'inconfort lié à l'éblouissement.
- **La probabilité d'éblouissement lumineux** (Wienold 2009) : c'est un facteur d'éblouissement qui, selon une direction donnée, calcule le potentiel d'éblouissement en terme de pourcentage d'occupants qui pourraient être éblouis dans un local. Plus celui-ci est élevé, plus l'inconfort est important. Cet indicateur est complémentaire au FLJ.
- **L'autonomie lumineuse** (Rogers and Goldman 2006) : c'est le pourcentage ou nombre d'heures d'occupation annuel où le niveau minimum d'éclairage requis est assuré par la seule lumière naturelle. Cet indicateur est utile pour concevoir des solutions dynamiques qui prennent en compte les conditions météorologiques, mais également pour estimer les besoins en matière d'éclairage artificiel. Une autonomie lumineuse élevée est représentative d'un système constructif favorable à la lumière naturelle. Tout comme le FLJ cet indicateur ne permet pas de tenir compte de l'éblouissement.

- **L'autonomie lumineuse maximum** : c'est le pourcentage ou nombre d'heures d'occupation annuelle où le niveau d'éclairage dépasse une valeur seuil. C'est un indicateur permettant de valoriser les solutions qui limitent l'éblouissement. Plus l'autonomie lumineuse maximum est importante, plus il y a un risque d'inconfort visuel. Cet indicateur est complémentaire à celui de l'autonomie lumineuse.
- **L'éclairage naturel utile** (Nabil and Mardaljevic 2006) : c'est le pourcentage ou nombre d'heures d'occupation annuel où le niveau d'éclairage assuré par la seule lumière naturelle est compris dans un intervalle de tolérance préalablement fixé. Un indicateur élevé est représentatif d'un bon confort visuel. C'est l'indicateur dynamique le plus complet en terme de confort visuel puisqu'il permet de valoriser les systèmes constructifs qui favorisent l'éclairage naturel au détriment de l'éclairage artificiel sans toutefois qu'il devienne une source d'éblouissement importante.

Ces indicateurs peuvent être calculés à l'aide de logiciels d'éclairage global, qui à partir d'algorithmes spécifiques (radiosité et lancer de rayons) font un calcul tridimensionnel de la propagation de la lumière (Maamari 2004).

Critères d'évaluation de la qualité de l'air et du confort olfactif

Lors de la phase d'exploitation, le système constructif peut être source de différents impacts sur le confort olfactif et la santé des usagers. Les produits de construction peuvent en effet émettre des polluants chimiques, des odeurs ou encore peuvent favoriser la croissance fongique ou bactérienne, etc. Ces sources potentielles d'inconfort internes au bâtiment doivent être traitées lors de processus de conception par le dimensionnement d'une ventilation adaptée ou par le choix de produits ayant des impacts sanitaires limités (Levin 1991). Concernant cette deuxième mesure, il existe par exemple un système d'étiquetage des émissions en polluants volatils pour les produits de construction et décoration à usage interne qui indique leur niveau d'émission en polluants volatils. Ces niveaux d'émission vont de la classe A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions). À l'échelle de la zone d'activité, les indicateurs permettant de quantifier l'impact des produits de construction sur l'inconfort olfactif et la santé des usagers ne sont actuellement pas maîtrisés en phase de conception. Les décisions concernant le système constructif sont donc généralement prises à l'échelle du matériau, selon les données des produits constructifs disponibles et à partir de l'expertise. En phase d'exploitation, des indicateurs significatifs peuvent ensuite être mesurés à l'échelle de la zone d'activité (CERTIVEA 2011).

Des travaux consacrés au développement de solutions de métrologie innovantes de la qualité de l'air ont conduit à la validation d'un outil de mesure in situ des émissions des matériaux (revêtements, mobiliers, textile ; etc.) nommé DOSEC® (Bourdin 2013). Cet outil permet de réaliser des audits de matériaux et à terme pourra être utilisé pour du suivi de production et la réalisation d'études pour l'étiquetage sanitaire. Une base de données des émissions de matériaux appelée COMATEM® a ainsi pu être complétée. Cette base de données est également intégrée à un module d'aide à la conception de bâtiments à qualité de l'air performante.

Critères d'évaluation du confort vibratoire des planchers

Dans les bâtiments multiétages, le plancher intermédiaire est un élément fonctionnel essentiel qui impacte le confort et la sécurité des usagers. Étayée par une tendance architecturale en faveur des grands espaces modulables et évolutifs, la conception de planchers de grande portée devient incontournable. Les planchers, particulièrement ceux constitués de structures légères et de matériaux peu rigides tels que le bois, sont alors très sensibles aux vibrations. Ces vibrations, provoquées par des sources internes au bâtiment telles que la marche ou le fonctionnement d'un appareil ménager, peuvent devenir des sources de désagréments importants.

En phase d'avant-projet, le niveau de confort vibratoire des planchers est généralement évalué par des calculs de prédimensionnement souvent guidés par les Eurocodes pour les produits standards ou les Avis Techniques pour les produits non-standards. Plusieurs types de planchers bois existent pour lesquels les méthodes d'évaluation du niveau de confort de ces planchers sont différentes. Trois classes de planchers peuvent être distinguées :

- *Les planchers à solives*

Dans le cas des planchers bois à solives dans des conditions d'exploitation courante, la qualification du confort vibratoire (N_{vib}) repose sur la méthode proposée sous conditions dans le paragraphe 7.3 de *l'Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a). Cette méthode s'appuie sur les valeurs de deux paramètres qui dépendent de la constitution du plancher et de sa rigidité.

Le premier de ces deux paramètres est la souplesse du plancher. Elle correspond au déplacement vertical engendré par une charge ponctuelle de 1 kN appliquée à l'endroit le plus défavorable, généralement entre deux solives. La souplesse du plancher peut être difficile à calculer. Ce paramètre dépend de la composition du plancher et il n'existe pas de formule simplifiée unique pour l'évaluer. Dans son guide, (Bocquet 2009) propose des méthodes de détermination de la souplesse de différents types de plancher à solives :

- platelage sur solivage simple ;
- platelage sur solivage simple renforcé transversalement ;
- platelage sur solivage supportant une chape béton légère et non collaborante ;
- platelage sur lambourde constituant des poutres transversales.

Le deuxième paramètre est la réponse en vitesse à une impulsion unitaire de 1 N/s. Cette réponse, également appelée vitesse impulsionnelle caractérise l'intensité des vibrations produites par l'activité humaine et ressenties par un autre occupant. Le calcul de la vitesse impulsionnelle est normalement complexe et doit faire appel à une étude dynamique du plancher. Dans le cas où la fréquence naturelle fondamentale du plancher est supérieure à 8 Hz, *l'Eurocode 5* propose une formule qui permet d'approcher la valeur de la vitesse impulsionnelle.

Pour être considéré comme satisfaisant vis-à-vis du confort vibratoire, le plancher à solives bois doit donc respecter deux critères qui font intervenir la vitesse impulsionnelle et la souplesse.

La souplesse du plancher a ne doit pas dépasser une valeur seuil de 3 mm/kN [III.6] et la vitesse impulsionnelle ne doit pas être supérieure à une vitesse impulsionnelle limite calculée [III.7].

$a < 3 \text{ mm/kN}$	[III.6]
où a est la souplesse du plancher	
$v \leq v_{lim}$	[III.7]
où :	
<ul style="list-style-type: none"> - v est la vitesse impulsionnelle du plancher en m/s ; - v_{lim} est la vitesse impulsionnelle limite du plancher en m/s. 	

Les calculs explicites de la souplesse et de la vitesse impulsionnelle sont détaillés dans l'Annexe C. À partir de ces paramètres, la qualification du confort vibratoire des planchers à solives peut s'appuyer sur l'Annexe Nationale de l'Eurocode 5 (AFNOR 2010a) qui donne une plage de confort vibratoire idéal selon la souplesse et le respect des critères suivant [III.8].

$0,5 < a < 1 \text{ mm/kN}$ et $f_{Hz} \geq 8 \text{ Hz}$ et $v_{lim} \leq v_{max}$	[III.8]
où f_{Hz} est la fréquence naturelle fondamentale du plancher en Hz.	

- *Les planchers de panneaux bois lamellés-croisés (CLT)*

La qualification du confort vibratoire des planchers réalisés à partir de panneaux CLT ne peut s'appuyer pour l'heure sur aucune norme. Elle peut toutefois s'appuyer sur les recommandations du guide canadien *Manuel CLT* (FPInnovations 2011) ou sur les Avis Techniques de chaque produit CLT. Le guide canadien donne un critère de vérification en fonction de la fréquence naturelle fondamentale du plancher et de sa souplesse.

Marquant ainsi un fort risque de nuisance, le *Manuel CLT* comporte un chapitre entièrement dédié aux vibrations des planchers. Dans ce chapitre une méthode de contrôle des vibrations facile d'emploi est proposée. Le critère suivant doit être satisfait pour que le plancher soit considéré comme ayant un comportement aux vibrations acceptable :

$\frac{f_{Hz}}{a^{0,7}} \geq 13 \Leftrightarrow a \leq \frac{f_{Hz}^{1,43}}{39}$	[III.9]
où :	
<ul style="list-style-type: none"> - f_{Hz} est la fréquence naturelle fondamentale du plancher en Hz ; - a est la flèche statique à mi-portée sous une charge de 1kN du panneau CLT de 1m de largeur en mm/kN. 	

- *Autres planchers bois non conventionnels*

L'évaluation du niveau de confort vibratoire des techniques utilisées pour des planchers bois non-conventionnels, tels que les planchers collaborants bois-béton, nécessite de réaliser des essais en laboratoire ou d'utiliser des méthodologies spécifiques mises à disposition par le fabriquant.

III.2.b La sécurité de l'ouvrage

La fonction première de l'habitat est de protéger l'utilisateur et ses biens en fonction de divers aléas climatiques, d'exploitation, d'environnement ou d'actions volontaires d'autres personnes selon un risque défini. Il s'agit donc ici d'assurer la sécurité de l'ouvrage. La performance consiste donc à ce que le bâtiment satisfasse aux conditions d'acceptabilité d'un risque, soit une probabilité de défaillance définie par le législateur. Plus simplement, pour le système constructif il s'agira de suivre les règles de dimensionnement structural en respectant la réglementation française. Finalement, c'est une performance à modalité binaire, soit le système constructif respecte les contraintes réglementaires soit il ne les respecte pas et dans ce cas la conception doit être revue car la solution est inacceptable. Afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage, des règles de conception et de mise en œuvre doivent également être respectées.

Sécurité structurale

Les Eurocodes sont les normes européennes de vérification harmonisée du dimensionnement des structures de bâtiment et de génie civil. Ils sont basés sur une approche semi-probabiliste de la sécurité comme tous les standards internationaux modernes. Ils définissent les seuils d'états limites associés à des coefficients partiels de sécurité. Les Eurocodes sont regroupés en 10 familles :

- Eurocode 0: bases de calcul des structures (EN 1990) ;
- Eurocode 1: actions sur les structures (EN 1991) ;
- Eurocode 2: calcul des structures en béton (EN 1992) ;
- Eurocode 3: calcul des structures en acier (EN 1993) ;
- Eurocode 4: calcul des structures mixtes acier-béton (EN 1994) ;
- Eurocode 5: conception et calcul des structures en bois (EN 1995) ;
- Eurocode 6: calcul des ouvrages en maçonnerie (EN 1996) ;
- Eurocode 7: calcul géotechnique (EN 1997) ;
- Eurocode 8: calcul des structures pour leur résistance aux séismes (EN 1998) ;
- Eurocode 9: calcul des structures en aluminium (EN 1999).

Le principe de justification d'une structure soumise à des charges permanentes et variables repose sur la vérification que ni l'un des Etats Limites Ultimes (ELU) ni l'un des Etats Limites de Service (ELS) n'est atteint ou dépassé. Les Etats Limites Ultimes sont associés aux différentes formes de défaillance structurale, et visent à assurer la sécurité des personnes et des biens. Les Etats Limites de Service correspondent à des conditions de fonctionnement des ouvrages et de confort des usagers au-delà desquelles les exigences d'aptitude au service ne sont plus satisfaites. L'objectif est donc d'assurer le confort des personnes (cf sous-section « Critères d'évaluation du confort vibratoire des planchers » page 92) et de limiter les déformations du bâtiment. Les Eurocodes 0 et 1 définissent les charges et actions à considérer et les combinaisons d'actions à prendre en considération. Chaque famille est potentiellement constituée d'une partie générale (partie 1-1), d'une partie concernant l'incendie (partie 1-2), d'une partie 2 concernant les ponts (si d'application) et d'autres parties spécifiques.

La démarche de vérification du dimensionnement d'un système constructif bois s'effectue à l'échelle de l'élément bois (Figure 28).

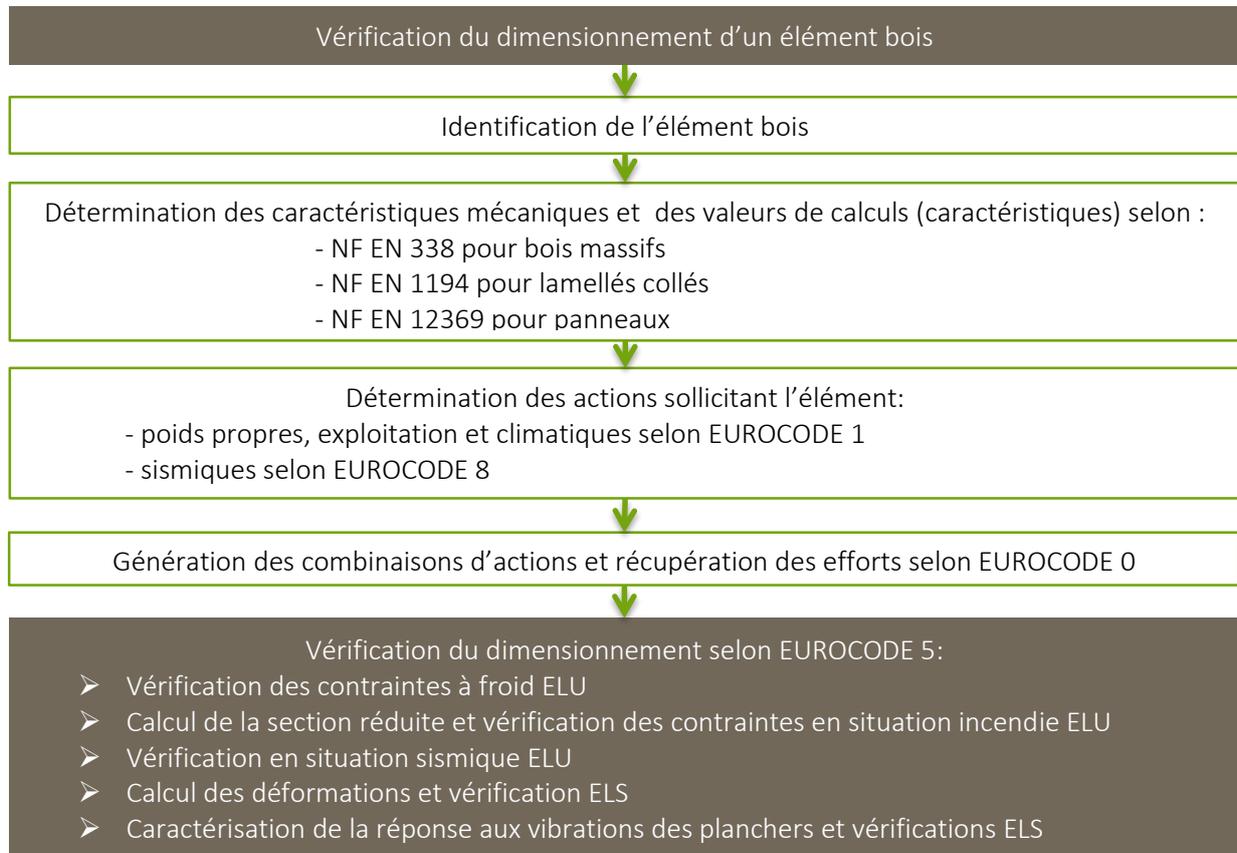


Figure 28 : Synoptique de la démarche « dimensionnement d'un élément bois » selon les Eurocodes

Spécificités de la sécurité incendie

Deux notions sont à différencier concernant la sécurité incendie : la résistance au feu et la réaction au feu.

La résistance au feu représente le temps pendant lequel la structure continue à remplir sa fonction durant un incendie. Les éléments concernés sont donc les éléments porteurs, mais aussi les éléments de séparation et de protection. L'*Eurocode 5 partie 1-2* (AFNOR 2008a) traite de la conception et du calcul des structures bois en cas d'incendie. Deux méthodes existent, la méthode simplifiée et la méthode de calcul avancée. La méthode simplifiée consiste à calculer dans un premier temps la section réduite qui est la section efficace obtenue par déduction de la profondeur de carbonisation à la section initiale. La contrainte exercée sur la structure est alors calculée à partir de cette section réduite puis comparée à la résistance, elle-même calculée selon des coefficients spécifiques à une situation d'incendie. Pour des calculs avancés, l'*Eurocode 5* précise la variation des propriétés physiques et mécaniques du bois en fonction de la température. Sur cette base, les calculs avancés peuvent être effectués avec un modèle par éléments finis. Cette méthode est rarement utilisée, car elle est plus coûteuse en temps d'étude.

La réaction au feu représente la capacité d'un produit à participer au développement du feu du fait de son caractère plus ou moins combustible. Les produits sont classés selon leur propriété à s'enflammer (A1 (incombustible), A2, B, C, D, E et F), mais aussi en fonction du dégagement de fumée (s_0 , s_1 , s_2) et de la production de gouttes enflammées (d_0 , d_1 , d_2) (AFNOR 2008b). La conception du système constructif consiste donc à sélectionner les produits qui permettent de répondre aux exigences réglementaires.

Ainsi, selon le type de la construction et la localisation de l'élément à dimensionner au sein de l'ouvrage, des niveaux de performances de protection incendie sont imposés en terme de résistance au feu des parois et de réaction au feu des parements. Il s'agit donc de dimensionner la structure et de choisir les éléments constructifs nécessaires au respect de ces exigences.

Exigences de conception pour assurer la pérennité de l'ouvrage

Des règles de conception et de mise en œuvre doivent être respectées pour assurer la pérennité de l'ouvrage. Celles-ci doivent permettre d'assurer l'étanchéité à l'eau et à l'air de la paroi et d'éviter tout risque de condensation. De plus, les matériaux utilisés doivent être durables vis-à-vis des risques liés aux insectes xylophages. Par exemple, les DTU (Documents techniques unifiés) permettent de définir les cahiers des clauses techniques et spéciales à respecter ainsi que des règles de calcul de dimensionnement. Ces documents viennent ainsi compléter les Eurocodes.

III.2.c Les impacts environnementaux

Le bâtiment doit permettre de protéger l'utilisateur et ses biens du milieu extérieur, en lui fournissant en toute sécurité, une ambiance confortable. En réalisant ces fonctions, le bâtiment ne doit pas porter atteinte à l'environnement. Au vu des enjeux climatiques, environnementaux et de la problématique liée à l'épuisement des ressources non renouvelables, cet aspect est devenu incontournable. Une approche globale consiste à considérer les énergies et émissions sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, mais également à considérer l'ensemble des impacts environnementaux et des ressources utilisées. Il faut pour cela distinguer les différentes phases de vie du bâtiment qui peuvent être regroupées en quatre grandes phases que sont la production, la construction, l'utilisation et la fin de vie. Concernant la performance environnementale du système constructif, deux échelles de conception peuvent être distinguées :

- L'échelle du bâtiment : il s'agit ici de limiter l'impact environnemental du système constructif en phase d'utilisation en cherchant notamment à améliorer sa contribution à l'efficacité énergétique du bâtiment.
- L'échelle du composant : Il s'agit ici de limiter l'impact environnemental du système constructif et de ses composants en dehors du contexte relatif à l'utilisation du bâtiment.

Un état de l'art résultant de l'analyse du cycle de vie énergétique de 73 bâtiments répartis selon 13 pays a montré que la phase d'utilisation représentait de 80 à 90% et les phases de production et construction de 10 à 20% de la demande énergétique globale du bâtiment

(Ramesh et al. 2010). La consommation énergétique du bâtiment en phase d'utilisation de l'ouvrage représente donc une part conséquente de l'énergie totale consommée sur tout le cycle de vie du bâtiment. À ce stade, les termes d'*énergie blanche* et d'*émission blanche* sont parfois employés pour désigner l'énergie consommée et les émissions de gaz à effet de serre produites pour assurer le fonctionnement du bâtiment (MESR 2013). La réduction de l'énergie et des émissions blanches des bâtiments est alors une performance essentielle à rechercher pour limiter l'impact environnemental du bâtiment. L'enveloppe, les protections solaires et les vitrages qui composent le système constructif sont des éléments impactant significativement ces performances (Pacheco et al. 2012). Les consommations énergétiques des équipements de chauffage, rafraîchissement et éclairage en dépendent largement.

La diminution de la consommation énergétique de l'ouvrage lors de son exploitation peut induire une augmentation de l'énergie consommée sur les autres phases de vie pouvant même devenir excessive et contreproductive sur le cycle de vie (Ramesh et al. 2010). Plus la conception des bâtiments s'oriente vers la haute efficacité énergétique, plus la prise en compte de l'*énergie grise*, qui représente l'énergie primaire totale consommée par l'ensemble des processus liés à la production du bâtiment, devient pertinente (Blengini and Di Carlo 2010). Il devient alors important de choisir les matériaux et composants du système constructif selon leur contribution à l'énergie grise du bâtiment.

La réglementation thermique française (RT2012) prévoit deux exigences relatives à l'efficacité énergétique des bâtiments. Ces exigences visent la limitation des besoins et des consommations d'énergie primaire en phase d'usage et ont pour but final de diminuer les consommations des ressources énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre du parc immobilier français. La première exigence limite le besoin bioclimatique ou *Bbio*. Il s'agit d'un indicateur calculé selon les besoins en énergie des trois postes de consommation suivant : chauffage, refroidissement et éclairage. Cet indicateur permet de considérer la conception bioclimatique d'un bâtiment indépendamment des équipements énergétiques. La deuxième exigence limite donc la consommation conventionnelle d'énergie primaire (*Cep*). Il s'agit de la somme des consommations en énergie primaire des postes de chauffage, production d'eau chaude sanitaire, refroidissement, éclairage et auxiliaires (ventilateurs, pompes) desquelles est déduite une éventuelle production photovoltaïque (limité à $12 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$). La conception du système constructif a donc un impact direct sur le *Bbio* et sur le *Cep*.

Le calcul réglementaire permet de positionner un bâtiment par rapport à des standards réglementaires indépendamment de son utilisation réelle. De nombreuses hypothèses sont alors standardisées et fixées et correspondent à des moyennes statistiquement établies pour l'ensemble des projets étudiés. Par conséquent, les résultats du moteur de calcul réglementaire sont approchés. Bien que la réglementation thermique ait pour atout de réguler, contrôler et valider la consommation globale du parc immobilier français sur une base commune, elle n'est pas suffisante pour concevoir un système constructif dans un environnement précis. D'autres modèles plus détaillés doivent alors être utilisés pour la conception de systèmes constructifs performants. Ces logiciels doivent pouvoir prendre en compte de manière précise les caractéristiques du système constructif du bâtiment étudié et de son environnement ainsi que des scénarios d'utilisation dynamiques précis qui diffèrent généralement de ceux de la réglementation thermique. Les besoins de chauffage, de rafraîchissement et l'autonomie

lumineuse peuvent alors être évalués pour déterminer l'impact du système constructif sur l'efficacité énergétique du bâtiment :

- **Besoins de chauffage et de rafraîchissement annuels** : Ils correspondent à la quantité d'énergie strictement nécessaire pour équilibrer le bilan énergétique du bâtiment afin de suivre une consigne de température souhaitée et s'expriment généralement en kWh/(m².an). En période hivernale, les besoins de chauffage compensent les apports gratuits tels que les apports solaires et les apports internes.
- **Autonomie lumineuse** : Elle consiste à évaluer le pourcentage ou nombre d'heures d'occupation ou l'éclairage artificiel n'est pas nécessaire (*cf.* la sous-section Critères d'évaluation du confort visuel page 90) selon une consigne de luminosité minimale exprimée en lux.

Pour diminuer l'impact du système constructif sur l'environnement, d'autres indicateurs doivent être considérés. La norme NF EN 15804 sur la contribution des ouvrages de construction au développement durable consiste à guider les déclarations environnementales sur les divers produits de construction (AFNOR 2012). Une liste des indicateurs de performance environnementaux à renseigner y est établie :

- *Impacts environnementaux* :
 - potentiel de réchauffement climatique (kg CO₂ équ.) ;
 - potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (kg de CFC11 équ.) ;
 - potentiel d'acidification des sols et de l'eau (kg de SO₂ équ.) ;
 - potentiel d'eutrophisation (kg de (PO₄)³⁻ équ.) ;
 - potentiel de formation d'ozone troposphérique (kg d'éthène équ.) ;
 - potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques non fossiles (kg de Sb équ.) ;
 - potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques fossiles (MJ).
- *Consommation des ressources* :
 - utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières (MJ) ;
 - utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées en tant que matière première (MJ) ;
 - utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (MJ) ;
 - utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières (MJ) ;
 - Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées en tant que matière première (MJ) ;
 - utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables (MJ) ;
 - utilisation de matière secondaire (kg) ;
 - utilisation de combustibles secondaires renouvelables (MJ) ;
 - utilisation de combustibles secondaires non renouvelables (MJ) ;
 - utilisation nette d'eau douce (m³).
- *Déchets* :
 - déchets dangereux éliminés (kg) ;
 - déchets non dangereux éliminés (kg) ;

- déchets radioactifs éliminés (kg).
- *Flux sortant* :
 - composants destinés à la réutilisation (kg) ;
 - matériaux destinés au recyclage (kg) ;
 - matériaux destinés à la récupération d'énergie (kg) ;
 - énergie fournie à l'extérieur (MJ).

Il s'agit alors pour chaque indicateur de sommer l'impact des différents composants du système constructif relativement à la quantité utilisée et à l'unité fonctionnelle définie.

III.3. Description du cas d'étude

III.3.a Géométrie et composition des parois

Le cas d'étude est inspiré d'un bâtiment réel situé dans une zone géographique proche de Bordeaux. Il porte sur un bâtiment d'habitation constitué de quatre logements collectifs identiques et superposés (R+3). Les logements d'une superficie de 51 m² habitables chacun sont constitués de deux pièces principales (Figure 29). Le plancher bas du logement en rez-de-chaussée est sur terre-plein. Une grande baie vitrée de 4,5 m de large donne sur l'une des deux pièces principales (cuisine/salon). Elle est orientée Sud avec une rotation de 14 degrés vers l'Ouest. Cette baie est surplombée par une casquette solaire horizontale de 2,2 m qui constitue le plancher du balcon du niveau supérieur. Des masques verticaux ainsi que le garde-corps délimitent le balcon. Deux autres fenêtres sont présentes dans la chambre (Ouest) et la salle de bain (Nord) et sont délimitées par un masque résultant de l'épaisseur de la paroi.

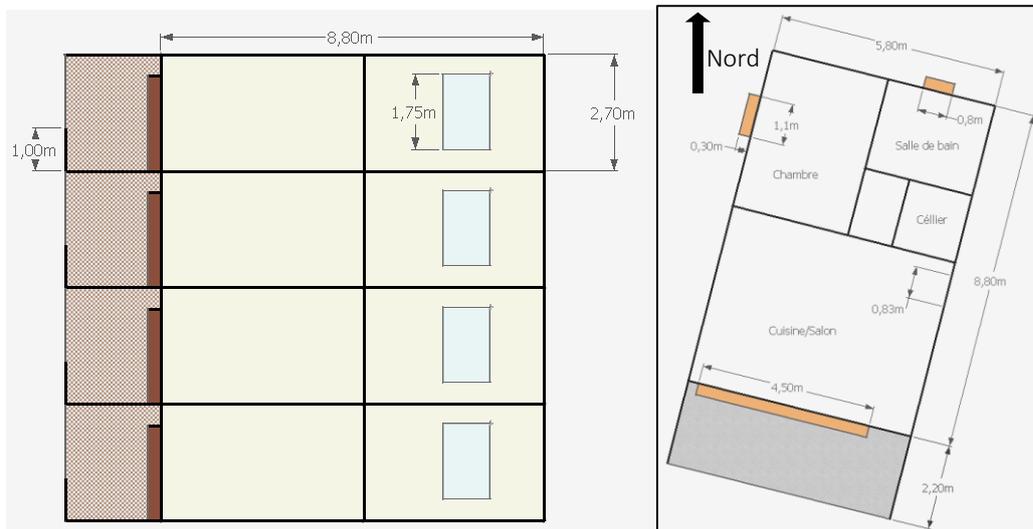


Figure 29 : Plan et coupe du bâtiment étudié

Le bâtiment voisin constitue un masque solaire permanent sur la façade Est du bâtiment étudié. La Figure 30 expose quelques représentations 3D du bâtiment étudié et de son environnement immédiat.



Figure 30 : Représentations 3D du bâtiment étudié

Les logements ne disposent pas de système de rafraîchissement actif : le rafraîchissement passif du bâtiment repose sur l'utilisation d'une ventilation naturelle nocturne. Les ouvertures sur l'extérieur des logements étant disposées sur des façades d'orientation différentes une ventilation traversante est ainsi utilisée. L'ouverture des fenêtres provoque un renouvellement d'air visant à rafraîchir le bâtiment.

 Tableau 3 : Composition des parois opaques²¹

COMPOSITION: EXTERIEUR ZONE -> INTERIEUR ZONE						
NOM	DESIGNATION	E_p [m]	λ [W/m.K]	ρ_v [kg/m ³]	C_p [J/kg.K]	U_p [W/m ² .K]
Mur Extérieur	Bardage ventilé	-	-	-	-	0,17
	Isolant laine minérale					
	+ Ossature 40x145 (entraxe 600)	0,14	0,038	20	840	
	Panneau CLT	0,081	0,13	500	1600	
	Isolant laine minérale	0,05	0,035	90	1030	
	Revêtement intérieur	0,013	0,35	875	800	
Plancher Bas	Dalle	0,15	1,7	2200	840	0,41
	Isolant polystyrène	0,06	0,028	30	1470	
	Chape	0,06	1,7	2200	840	
Toiture à solives	EPDM (Etylène propylène diène monomère)	0,0015	0,25	1150	1000	0,10
	Isolant laine minérale	0,05	0,035	90	1030	
	Isolant laine minérale					
	+ Ossature 62x240 (entraxe 305mm)	0,24	0,032	20	840	
	Panneau de platelage type OSB	0,022	0,13	500	1600	
	Isolant laine minérale	0,08	0,035	90	1030	
	Revêtement intérieur	0,013	0,35	875	800	
Plancher intermédiaire	Revêtement plafond	0,013	0,35	875	800	-
	Isolant laine minérale	0,08	0,035	90	1030	
	Panneau CLT	0,1	0,13	500	1600	
	Chape	0,08	1,7	2200	840	
Cloison	Revêtement intérieur	0,013	0,35	875	800	-
	Isolant laine minérale	0,045	0,035	90	1030	
	Revêtement intérieur	0,013	0,35	875	800	

²¹ Les données techniques des matériaux utilisés proviennent soit de données constructeurs lorsqu'elles étaient disponibles dans le cas réel (ISOVER, Placoplatre,...) soit de données provenant des règles TH-U de la RT2012.

Les cloisons qui forment les partitions intérieures du bâtiment ne sont pas porteuses. Les planchers intermédiaires et la toiture ont donc une portée de 5,88 m correspondant à la largeur du bâtiment. Les balcons constituant les masques de la fenêtre Sud ainsi que les escaliers du bâtiment sont des structures autoporteuses. Les charges de la toiture, des planchers intermédiaires, des partitions et des murs extérieurs sont ainsi reprises par les murs latéraux d'une longueur de 8,8m. La structure porteuse des murs extérieurs et du bâtiment est constituée de panneaux de bois en CLT. Les planchers intermédiaires sont également constitués de panneaux CLT recouverts d'une chape béton de 6 cm. La structure de la toiture quant à elle est composée de solives bois.

Les compositions de l'ensemble des parois opaques du bâtiment de référence qui est le bâtiment réel dont s'inspire le cas d'étude sont détaillées dans le Tableau 3. L'épaisseur E_p , la conductivité thermique λ , la masse volumique ρ_v et la chaleur spécifique C_p de chacun des éléments sont spécifiées ainsi que le coefficient de déperdition thermique des parois U_p .

Les fenêtres sont composées de double vitrage peu émissif. Les valeurs tabulées des caractéristiques des parois vitrées de la RT2012 ont été utilisées pour le cas de référence. Le cadre de menuiserie a un coefficient de déperdition thermique de 1,5 W/(m².K). Le coefficient de déperdition thermique U_w et le facteur solaire S_w ²² caractérisant les performances thermiques de la menuiserie sont alors calculés en fonction du ratio de clair de vitrage²³ des menuiseries et de leurs dimensions.

Tableau 4 : Caractéristiques des ouvrants²⁴

	DIMENSIONS [M]	RATIO DE CLAIR DE VITRAGE [-]	U_w [W/M ² .K]	S_w [-]
Fenêtre Sud	4,5x2,2	79%	1,3	0,51
Fenêtre Ouest	1,75x1,05	76%	1,6	0,49
Fenêtre Nord	0,75x1,05	76%	1,6	0,49
Porte	0,83x2,04	0	1,6	-

Les ponts thermiques intégrés résultant de la structure bois dans les éléments de toitures et de murs ont été considérés par le biais de conductivités thermiques équivalentes calculées selon l'équation [III.14] page 116.

La jonction des parois induit également des ponts thermiques linéiques et ponctuels. Pour estimer ces ponts thermiques des estimations en régime statique doivent être réalisées selon la norme EN 10211 (AFNOR 2008c). Généralement des abaques fournissent les valeurs pour les principaux modes constructifs directement sous forme de déperditions supplémentaires via des coefficients de ponts thermiques linéiques et ponctuels. Ces valeurs tabulées statiques sont en désaccord avec le caractère dynamique des simulations thermiques dynamiques. De plus, le

²² Le facteur solaire d'une paroi est le rapport entre l'énergie due au rayonnement solaire transmise et l'énergie reçue par la paroi.

²³ Le clair est la partie vitrée de la fenêtre qui permet la vue et la luminosité. Une fenêtre est ainsi constituée d'une partie vitrée, le clair de vitrage et d'une partie opaque, la menuiserie. Le ratio de clair de vitrage quantifie la part vitrée d'une fenêtre.

²⁴ Les données techniques des fenêtres utilisées proviennent de données issues des règles TH-U de la RT2012.

logiciel EnergyPlus ne permet ni de considérer ces valeurs tabulées de manière simple ni de les évaluer dynamiquement. Dans cette étude, ils n'ont donc pas été intégrés. La considération des ponts thermiques de jonction reste donc une perspective d'apport à ces travaux de thèse.

III.3.b Climatologie de l'étude

Pour effectuer les simulations thermiques dynamiques, le fichier météo utilisé est issu de la base de données IWEC (International Weather for Energy calculations) de l'ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) et correspond à la zone climatique de Bordeaux. Les données sont une compilation de données horaires mesurées et choisies parmi les données sur une période de 25 ans, de manière à représenter une année type.

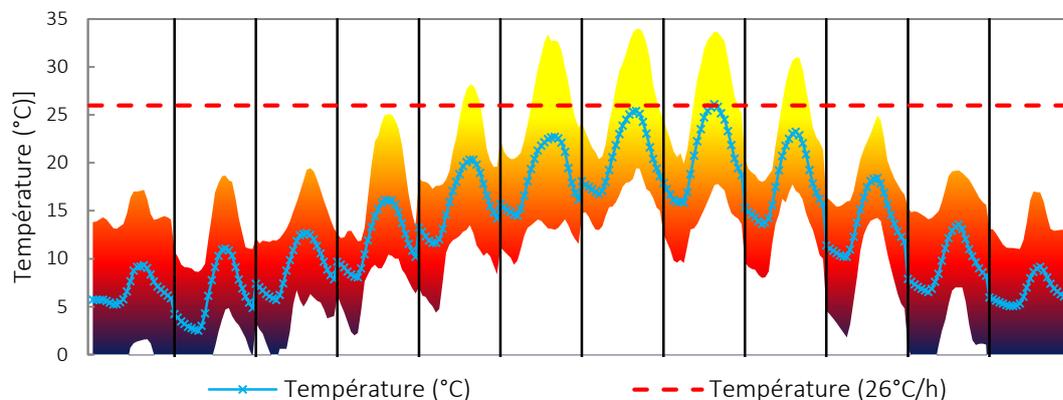


Figure 31 : Profil de température extérieure annuelle (Bordeaux)

Sur la Figure 31, la courbe bleue présente le profil de température d'une journée moyenne pour chacun des 12 mois de l'année, tandis que la surface colorée délimite les températures extrêmes. La droite rouge indique la température limite de confort (26°C).

La Figure 32 présente un graphe cumulé des températures extérieures. Selon le fichier météo, la température annuelle moyenne est de **13,22°C**, et les températures minimales et maximales sont respectivement de **-8,13°C** et **34,00°C**. La température dépasse **26°C** durant **304h** au cours de l'année.

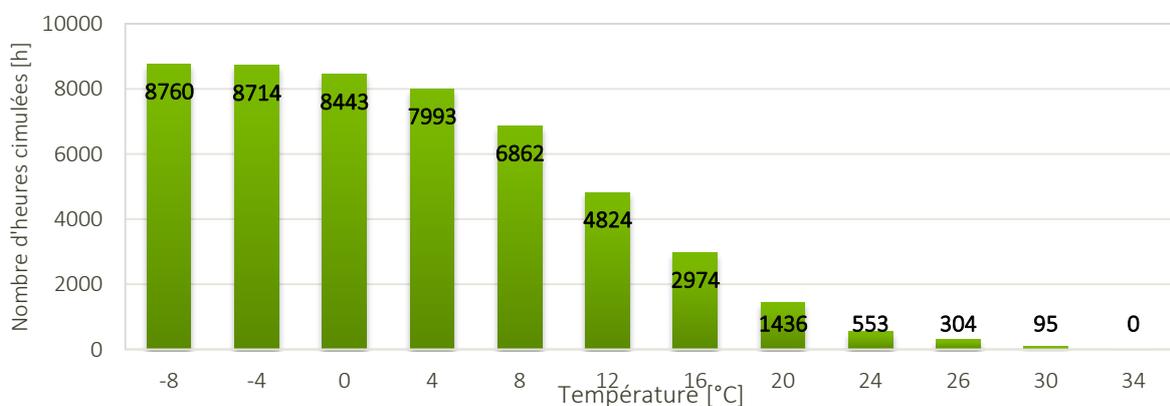


Figure 32 : Température extérieure, nombre d'heures cumulées

III.3.c Hypothèses relatives à la thermique du bâtiment

Une zone thermique a été considérée par logement. Le bâtiment est donc constitué de quatre zones thermiques superposées.

Les logements sont occupés par deux adultes présents selon les profils d'occupation présentés en Figure 33. Le weekend les occupants sont présents de façon permanente. Les apports internes des occupants sont à la fois sensibles (apports radiants et convectifs) et latents (apports hydriques dans les locaux). Dans cette étude, seuls les apports sensibles ont été considérés avec une puissance dissipée moyenne de 90W par occupant en journée et de 63W la nuit selon les hypothèses de calcul de la réglementation thermique 2012 (MEEDDM 2010).

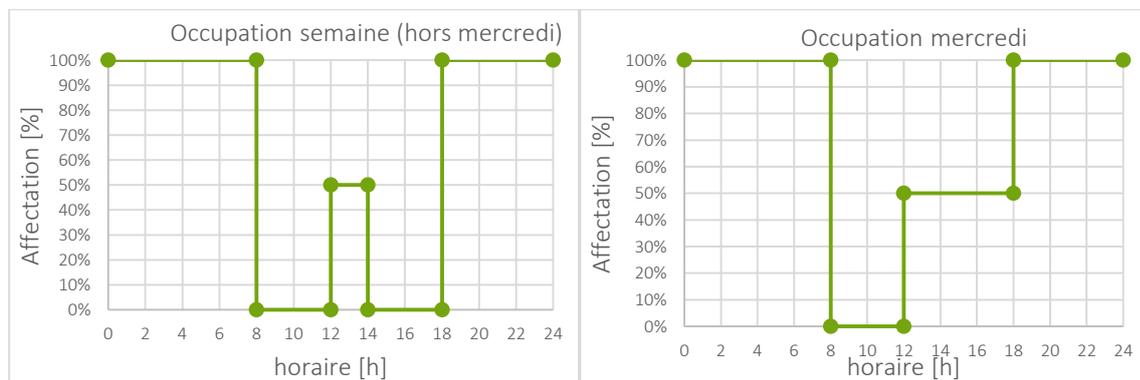


Figure 33 : Profils d'occupation des logements (pour deux occupants)

Les scénarios correspondant à l'utilisation de l'éclairage et des appareils électroménagers suivent les périodes d'occupation avec une puissance dissipée en journée de 5W/m² (Figure 34). Hors période d'occupation et en période nocturne, une puissance dissipée continue correspondant à 20% de cette puissance a été fixée. Enfin durant les périodes de cuisine, une puissance additionnelle de 5W/m² a été considérée. Ces valeurs ont été arbitrairement fixées pour conserver un caractère dynamique des usages, mais ont un ordre de grandeur proche de celui utilisé par les hypothèses de calcul de la réglementation thermique 2012 (MEEDDM 2010).

Le débit de ventilation est calculé selon l'arrêté du 24 mars 1982 sur les dispositions relatives à l'aération des logements (République Française 1982). Pour un logement de deux pièces avec salle de bain avec cabinet d'aisances, les débits extraits du logement doivent pouvoir atteindre 105 m³/h (soit 30/90 m³/h pour la cuisine et 15 m³/h pour la salle de bain). Le débit de renouvellement d'air au sein d'un logement est alors de 45 m³/h en période de base et de 105 m³/h en période de pointe (durant les périodes de cuisine selon la Figure 34). Il varie donc de 0,32 vol/h à 0,75 vol/h selon l'activité des occupants. Ce renouvellement d'air est couvert par une ventilation mécanique de type simple flux.

La perméabilité à l'air d'une construction correspond aux écoulements aérauliques parasites causés par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe. La réglementation thermique 2012 fixe des objectifs de performances relatifs à l'étanchéité à l'air. Pour les logements collectifs le débit de fuite ne doit pas dépasser 1 m³/h par m² de surface déperditive hors plancher bas sous une dépression de 4 Pa (MEEDDM 2010). Cette valeur seuil a donc été considérée comme valeur de base pour le cas d'étude.

Les besoins de chauffage sont calculés en supposant un système idéal qui fournit les puissances nécessaires pour maintenir la température de consigne en équilibrant les différentes pertes et apports de chaleur. La consigne de chauffage est de 19°C en période d'occupation et de 16°C hors occupation.

Les débits de renouvellement d'air résultant de la ventilation naturelle sont issus du bâtiment de référence modélisé sous EnergyPlus avec le module intégré AIRNET (*Airflow Network*) développé par Walton (1989)²⁵. AIRNET est un modèle multizone offrant la possibilité de simuler les échanges aérauliques au travers d'orifices et de grandes ouvertures. Il se base sur un réseau de nœuds de température et de pression pour déterminer les mouvements d'air à travers les zones de la simulation. Les coefficients de pression rendant compte de la pression du vent sur le bâtiment sont associés à des nœuds de pression externe. AIRNET permet ainsi de définir des mouvements d'air à l'intérieur du bâtiment et de simuler les phénomènes de ventilation naturelle.

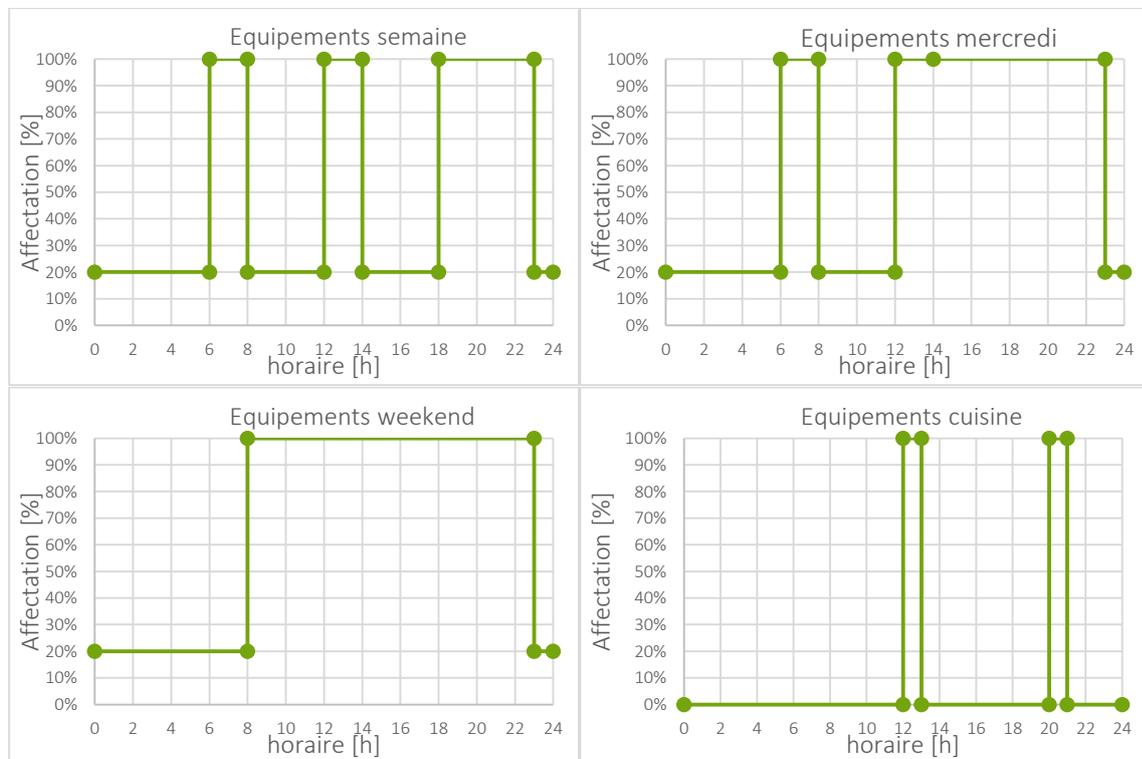


Figure 34 : Profils des puissances dissipées par les appareils électroménagers et l'éclairage

La ventilation naturelle a été modélisée avec des hypothèses spécifiques à la gestion des ouvertures de fenêtre. La surface ouvrante considérée pour le calcul de ventilation naturelle correspond à 30% de la surface des menuiseries²⁶. Les conditions d'ouverture des fenêtres sont les suivantes :

²⁵ Dans cette étude, pour faciliter la modélisation et le calcul des différents coefficients de pression le bâtiment de référence a été modélisé à l'aide de DesignBuilder. Ce logiciel de thermique dynamique réalise une interface intuitive avec EnergyPlus et plus spécifiquement avec AIRNET.

²⁶ Cette valeur correspond au minimum requis par l'une des exigences de moyen de la RT2012 dans la zone climatique considérée (H2c avec une altitude à 400m pour des bruits BR1 BR2 et BR3) (MEEDDM 2010)

- la température intérieure est supérieure à 22°C ;
- la température intérieure est supérieure à la température extérieure ;
- la période d'ouverture se situe entre 19h et 8h.

Tenant compte de l'ensemble des hypothèses préalablement énumérées une simulation thermique dynamique du bâtiment de référence a alors été réalisée. L'utilisation d'AIRNET, augmente la complexité du modèle et ralentit les temps de simulation. Afin de ne pas alourdir les temps de calcul durant la création des métamodèles, des scénarios moyens mensuels de renouvellement d'air correspondant à une journée type ont été implantés pour chaque logement dans le modèle EnergyPlus et sont donnés dans l'Annexe B. Sur un ordinateur personnel cadencé à 2,53 Hz la simulation du cas de référence a duré 5 minutes avec le modèle AIRNET contre 21 secondes avec les scénarios moyens.

III.4. Choix des objectifs pertinents pour l'optimisation d'un système constructif bois adapté au bâtiment multiétage

La méthode développée vise l'optimisation de systèmes constructifs de bâtiments bois multiétages. Ces systèmes constructifs doivent respecter les contraintes réglementaires et être compétitifs en ce qui concerne les performances d'usage. Cela comprend le confort des usagers, la sécurité de l'ouvrage et l'impact environnemental sur le cycle de vie du bâtiment.

Certaines contraintes relatives aux exigences réglementaires et normatives doivent être respectées de façon stricte sans outrepasser les seuils réglementaires ; car aller au-delà des seuils n'apporte aucune plus-value au système constructif. Par exemple, lorsque le système constructif va au-delà des exigences de sécurité de l'ouvrage requises, il peut être qualifié de système « surdimensionné ». Les performances d'usage et d'impact environnemental peuvent également être limitées par des seuils réglementaires, mais le fait de les surpasser permet d'apporter une valeur ajoutée au système constructif et améliore sa compétitivité.

Les objectifs à optimiser sont alors choisis selon ces différentes considérations (Tableau 5).

Tableau 5 : Liste des objectifs choisis et développés dans cette approche

-
- *minimiser l'inconfort thermique estival ;*
 - *maximiser le confort vibratoire des planchers intermédiaires ;*
 - *minimiser les besoins de chauffage ;*
 - *minimiser le potentiel de réchauffement climatique ;*
 - *minimiser l'énergie grise.*
-

III.4.a Choix des objectifs de confort de l'utilisateur

Dans la section I.1.c du premier chapitre, l'un des freins techniques relevés pour le développement de la construction bois est le manque d'inertie thermique des bâtiments bois. L'inertie thermique a un rôle essentiel dans le maintien d'un confort thermique estival (Di Perna et al. 2011). L'utilisation de systèmes de rafraîchissement actifs pour compenser ce manque d'inertie peut être évitée comme cela a déjà été le cas dans de nombreux projets aquitains (Armand-Decker et al. 2013). Les propriétés hygroscopiques²⁷ des matériaux bois peuvent impacter la gestion de l'humidité au sein des zones d'activité. Néanmoins, la modélisation de cet aspect nécessite le développement de modèles de transfert couplés de masse et de chaleur actuellement inexistantes ou non intégrés aux logiciels de simulation thermique dynamique usuels. Il est donc difficile de caractériser les performances du système constructif en phase de conception. La gestion de l'humidité relative au sein des zones d'activité est donc considérée comme étant réalisée par le biais des systèmes de ventilation naturelle et mécanique et de l'utilisation d'une membrane freine ou pare vapeur. L'étude du système constructif sur le confort hygrothermique concerne donc uniquement l'aspect thermique. L'un des objectifs traités dans cette approche consiste alors à **minimiser l'inconfort thermique estival**.

Tout comme le confort hydrique, le confort olfactif et la qualité de l'air d'un bâtiment dépendent principalement des renouvellements d'air par ventilation naturelle ou mécanique et du choix des matériaux en phase de conception. L'évaluation des performances du système constructif sur ces critères de confort en phase de conception n'est aujourd'hui pas maîtrisée. De plus, ce sont les produits de construction et décoration à usage interne (ex. : peinture) qui ont le plus d'impact à l'échelle du système constructif et qui ne font pas partie des éléments optimisés dans cette étude. L'optimisation du confort olfactif et la qualité de l'air n'ont donc pas été retenues comme étant des objectifs pertinents dans cette étude.

Dans la construction multiétage bois se pose la question de la composition des planchers intermédiaires. Ils peuvent avoir un apport d'inertie thermique non négligeable pour le confort thermique. Mais ils doivent également être conçus pour l'obtention d'un confort vibratoire convenable. Comme frein relevé à l'utilisation du bois dans la construction, le confort vibratoire des planchers bois est l'objet de nombreuses études scientifiques (Hu and Chui 2004; Hengxi 2006; Hamm et al. 2010). Pour être compétitif, un plancher bois doit présenter un bon niveau de confort vibratoire. Comme il a été vu précédemment, il est aujourd'hui possible d'évaluer pour les planchers à solives et les planchers en bois lamellé croisé. Il s'agit donc ici de **maximiser le confort vibratoire des planchers**²⁸.

La conception du système constructif est un élément prépondérant à la performance acoustique des bâtiments. Comme explicité dans la section III.2.a., les performances acoustiques des parois bois sont aujourd'hui peu connues et difficiles à évaluer en phase de conception. Lorsque les configurations de parois considérées sont compatibles avec la méthode du projet Acoubois, le confort acoustique peut être considéré en tant qu'objectif

²⁷ Un matériau hygroscopique est un matériau où la condensation capillaire se forme rapidement (pour des humidités relatives faibles). Il a ainsi une grande capacité à adsorber et désorber de l'eau.

²⁸ Afin de minimiser l'ensemble des fonctions-objectif considérées, dans la suite de cette étude il s'agira de minimiser le niveau d'inconfort vibratoire des planchers.

pertinent à optimiser. Toutefois, les configurations étudiées peuvent vite différer de celles considérées dans cette méthode, ne serait-ce qu'en modifiant les épaisseurs d'isolant considérées. C'est pourquoi le confort acoustique ne sera pas retenu, mais devra être considéré en tant que perspective d'apport à ce travail.

Enfin, le confort visuel est également très influencé par le système constructif et plus particulièrement par les parois vitrées et les protections solaires. Le confort lié à l'éblouissement peut être simplement réglé par l'usage de stores intérieurs mobiles sans modifier le système constructif et sans influencer les autres objectifs à optimiser. Le confort lié à l'éclairage naturel est quant à lui interdépendant avec d'autres critères de performance tels que le confort thermique et les besoins de chauffage. Bien que pertinent, l'objectif de confort visuel n'a pas été retenu dans le développement de cette approche. Tout comme le confort acoustique, il s'agira ici aussi de le considérer comme perspective d'apport.

III.4.b Choix des objectifs environnementaux du bâtiment

Dans cette étude, la minimisation des besoins de chauffage est considérée en tant qu'objectif pertinent pour limiter l'impact environnemental du bâtiment en phase d'usage. La minimisation des besoins de chauffage permet alors de minimiser simultanément les consommations de chauffage et le potentiel de réchauffement climatique sur la phase d'usage indépendamment du système énergétique considéré.

À l'échelle du composant, les critères d'évaluation du système constructif sont nombreux. La diminution du potentiel de réchauffement climatique qui est représentatif des émissions des gaz à effet de serre est un enjeu majeur considéré par les politiques internationales. Dans cette optique, la France vise la diminution des émissions de gaz à effet de serre et de consommation énergétique (Grenelle Environnement 2010).

Dans cette étude, les objectifs de diminution de l'impact environnemental du bâtiment consistent alors à *minimiser les besoins de chauffage*, à *minimiser le potentiel de réchauffement climatique* et à *minimiser l'énergie grise*.

III.5. Détermination des variables significatives et graphe d'influence

III.5.a Variables de conception envisageables

Pour obtenir des compromis Pareto-optimaux, plusieurs variables de conception ont été envisagées dans cette étude. Dans un projet réel, leur choix dépend de décisions collectives de l'équipe de conception ; d'autres variables auraient donc pu être considérées. Dans un premier temps, plusieurs variables de décision ont été envisagées puis, afin de réduire leur nombre, certaines variables significatives des objectifs de thermique ont été sélectionnées et d'autres ont été fixées.

Les fenêtres et les parois opaques du bâtiment peuvent varier d'un élément à l'autre. Se distinguent alors les planchers intermédiaires, les murs extérieurs, la toiture, le plancher bas et les cloisons internes.

Variables relatives aux planchers intermédiaires (PI)

Les variables relatives au plancher intermédiaire peuvent influencer l'intégralité des objectifs choisis. Selon la portée du plancher considérée, l'obtention d'un confort vibratoire satisfaisant pour un plancher bois mène à rigidifier la structure via l'augmentation de la dimension des éléments bois ou encore l'usage d'une chape béton. De même l'augmentation de l'épaisseur d'une chape béton ou l'utilisation d'un plancher béton va diminuer l'inconfort thermique estival. En contrepartie l'augmentation de dimension des éléments bois et l'usage d'une chape ou dalle béton peuvent avoir un impact néfaste sur l'énergie grise et le potentiel de réchauffement climatique sur le cycle de vie du bâtiment.

Le type de plancher est ici une variable de type qualitative nominale. Les planchers peuvent donc être des planchers constitués de panneaux bois lamellés croisés (Figure 36), des planchers à solives (Figure 35) ou des planchers béton (Figure 37). D'autres variables quantitatives discrètes et continues sont considérées telles que l'entraxe, l'épaisseur, la hauteur des solives et le nombre de renforts pour le plancher à solives, le nombre de plis et leur épaisseur pour le plancher CLT, l'épaisseur du panneau de revêtement au niveau du plafond et l'épaisseur d'une éventuelle chape. Le matériau du panneau de revêtement du plafond est également une variable : il peut s'agir d'un panneau constitué de gypse (type Placoplatre®) ou d'un panneau constitué d'un mélange de gypse et de cellulose (type Fermacell®). Enfin une dernière variable concerne le type d'isolant utilisé et plus particulièrement sa masse volumique. Le type d'isolant utilisé tout comme le type de revêtement

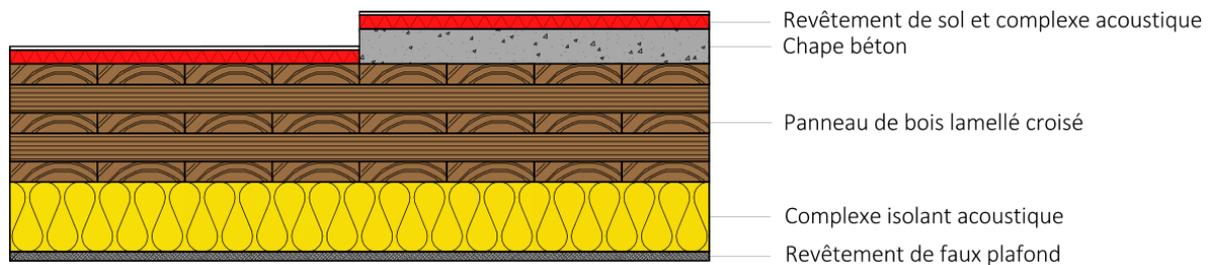


Figure 35 : Illustration de la composition du plancher intermédiaire type « CLT »

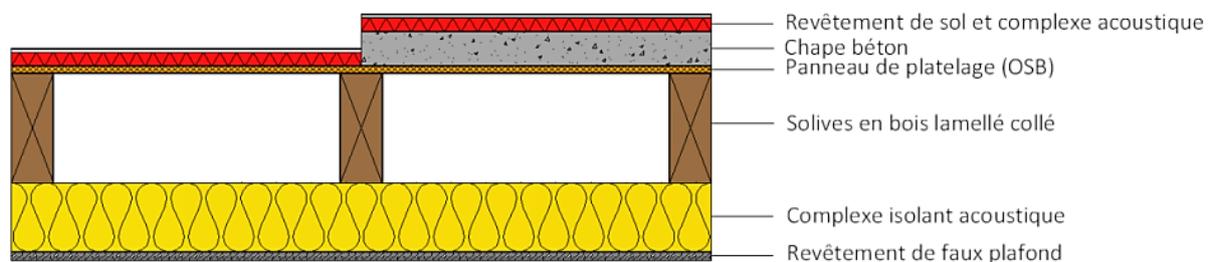


Figure 36 : Illustration de la composition du plancher type « solives »

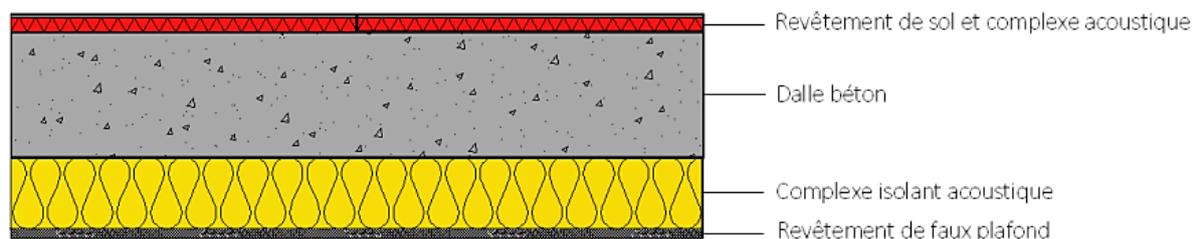


Figure 37 : Illustration du plancher type « béton »

L'ensemble des variables envisagées concernant la composition des planchers intermédiaires et leur domaine de variation est explicité dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Description des variables relatives au plancher intermédiaire

VARIABLES	DESCRIPTION	UNITE	TYPE DE VARIABLE	DOMAINE DE VARIATION OU VALEUR
Type_PI	Type de plancher intermédiaire	-	Nominale	Type_PI={CLT ;Solives ;Beton}
nb_plis_PI	Nombre de plis CLT	-	Discrète	nb_plis_PI ={3;5;7}
h_plis_T_PI	Épaisseur des plis CLT transversaux	m	Continue	$0,02 \leq h_{\text{plis_T_PI}} \leq 0,06$
h_plis_L_PI	Épaisseur des plis CLT longitudinaux	m	Continue	$0,02 \leq h_{\text{plis_L_PI}} \leq 0,08$
h_plis_L_Plb	Épaisseur des plis CLT extérieurs longitudinaux pour les panneaux 5 plis	m	Continue	$0,02 \leq h_{\text{plis_L_PIb}} \leq 0,08$
nb_rt	Nombre de renfort	-	Discrète	nb_rt ={1;3;5;7}
h_sol	Hauteur des solives	m	Continue	$0,1 \leq h_{\text{sol}} \leq 0,4$
b_sol	Épaisseur des solives	m	Continue	$0,07 \leq b_{\text{sol}} \leq 0,21$
e_sol	Entraxe des solives	m	Discrète	$e_{\text{sol}} \in [0,3;1]$ avec discrétisation de 0,1
Type_isol_int	Matériau de l'isolant intérieur	-	Nominale	Type_isol_int={Poly ;FDV32 ;FDV35 ;LDR}
Ep_rev_P	Épaisseur du panneau de revêtement du plafond	m	Discrète	Ep_rev_P ={0,013;0,026;0,039}
Ep_chape	Épaisseur de la chape béton	m	Continue	$0,4 \leq Ep_{\text{chape}} \leq 0,1$ ou $Ep_{\text{chape}}=0$
Type_rev	Type de panneau de revêtement	-	Nominale	Type_rev={gypse ;gypse cellulose}

Variables relatives au mur extérieur (ME)

Les variables relatives au mur extérieur ont une influence sur les objectifs thermiques et environnementaux. Par exemple, l'augmentation de l'épaisseur du revêtement intérieur ou de l'épaisseur totale d'isolation peut avoir un impact positif respectivement sur le confort thermique estival en augmentant l'inertie thermique du bâtiment et sur les besoins de chauffage en augmentant la résistance thermique de la paroi, mais peuvent également engendrer une augmentation de l'énergie grise et du potentiel de réchauffement climatique sur le cycle de vie du bâtiment. De même que le type de plancher, le type de mur est également une variable qualitative nominale : il peut s'agir d'un mur constitué de panneaux CLT ou d'un mur à ossature (Figure 38). D'autres variables quantitatives discrètes et continues sont considérées telles que l'entraxe, l'épaisseur et la largeur des montants pour le mur à ossature, l'épaisseur des plis pour le mur CLT, l'épaisseur du panneau de revêtement intérieur et l'épaisseur des isolants (intérieur et extérieur). Le matériau du panneau de revêtement intérieur est identique à celui utilisé en revêtement du plafond : il peut s'agir d'un panneau constitué de gypse ou d'un panneau constitué d'un mélange de gypse et de cellulose. Enfin les matériaux des isolants sont également variables.

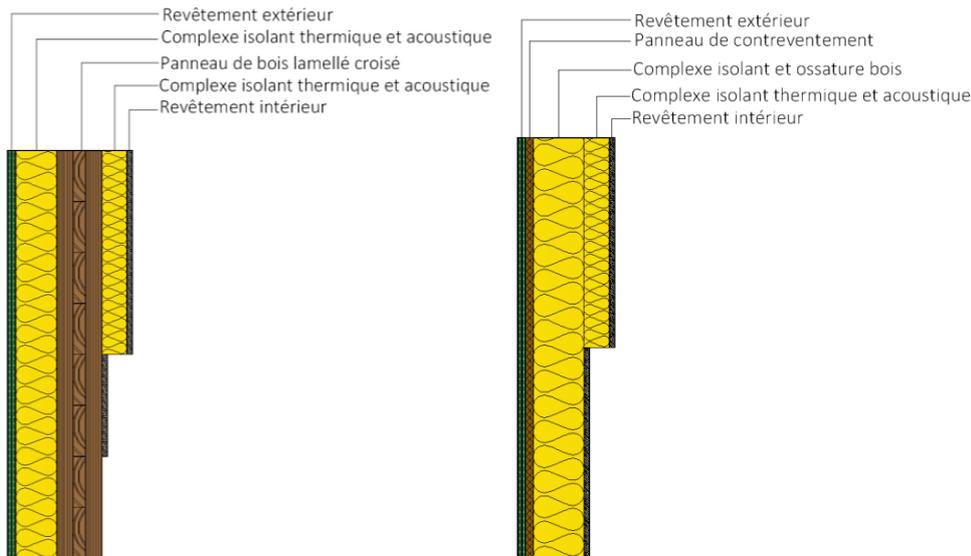


Figure 38 : Illustration de la composition des murs type CLT (gauche) et type à ossature (droite)

L'ensemble des variables envisagées concernant la composition murs extérieurs et leur domaine de variation sont explicités dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Description des variables relatives aux murs extérieurs

VARIABLES	DESCRIPTION	UNITE	TYPE DE VARIABLE	DOMAINE DE VARIATION OU VALEUR
Type_ME	Type de mur extérieur	-	Nominale	Type_ME={CLT ;Ossature}
h_plis_T_ME	Épaisseur des plis transversaux	CLT m	Continue	$0,02 \leq h_plis_T_ME \leq 0,03$
h_plis_L_ME	Épaisseur des plis longitudinaux	CLT m	Continue	$0,02 \leq h_plis_L_ME \leq 0,03$
L_montants	Largeur des montants	m	Continue	$L_montants = Ep_isol_ME_ext$
b_montants	Épaisseur des montants	m	Continue	$0,07 \leq b_montants \leq 0,21$
e_montants	Entraxe des montants	m	Discrète	e_montants {0,3 ;0,4 ;0,6}
Ep_isol_ME_ext	Épaisseur du complexe isolant extérieur	m	Continue	$0,1 \leq Ep_isol_ME_ext \leq 0,24$
Type_isol_ME_ext	Matériau de l'isolant extérieur	-	Nominale	Type_isol_ME_ext={Poly ;FDV32 ;FDV35}
Type_isol_int	Matériau de l'isolant intérieur	-	Nominale	Type_isol_int={Poly ;FDV32 ;FDV35 ;LDR}
Ep_isol_ME_int	Épaisseur de l'isolant intérieur	m	Discrète	Ep_isol_ME_int = {0 ;0,05}
Ep_rev_ME	Épaisseur du panneau de revêtement intérieur	m	Discrète	Ep_rev_ME = {0 ;0,013 ;0,026 ;0,039}
Type_rev	Type de panneau de revêtement	m-	Nominale	Type_rev={gypse ;gypse cellulose}

Variables relatives à la toiture (T) et au plancher bas (PB)

De même que les murs extérieurs, les variables relatives à la toiture et au plancher bas influencent les besoins de chauffage, l'inconfort estival, le potentiel de réchauffement climatique et l'énergie grise. Les variables relatives à la toiture concernent l'épaisseur et le type d'isolants et de revêtement de plafond. Pour le plancher bas seuls l'épaisseur et le type d'isolant ont été considérés.

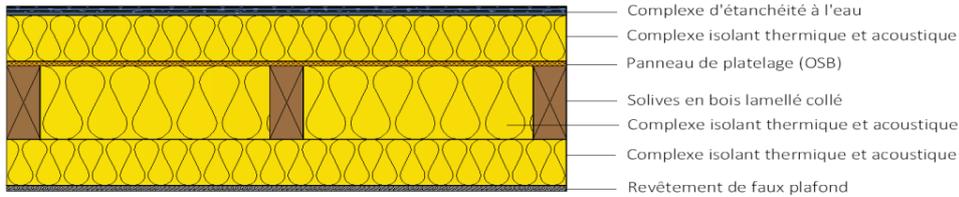


Figure 39 : Illustration de la composition de la toiture à solives

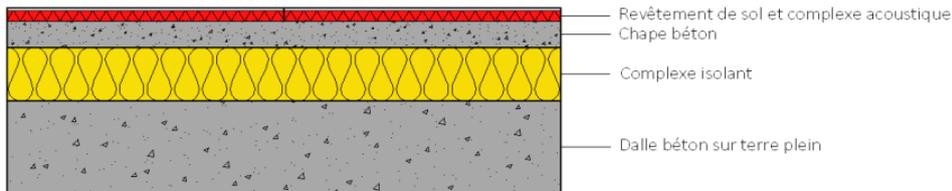


Figure 40 : Illustration de la composition du plancher bas

L'ensemble des variables envisagées concernant la composition du plancher bas et leur domaine de variation sont explicités dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Description des variables relatives aux planchers haut et bas

VARIABLES	DESCRIPTION	UNITE	TYPE DE VARIABLE	DOMAINE DE VARIATION OU VALEUR
Ep_isol_T	Épaisseur de surépaisseur d'isolation intérieure et extérieure de la toiture	m	Continue	$0 \leq Ep_isol_T \leq 0,13$
Type_isol_T_ext	Matériau de l'isolant extérieur	-	Nominale	Type_isol_T_ext={Poly ;FDV32 ;FDV35}
Type_isol_int	Matériau de l'isolant intérieur	-	Nominale	Type_isol_int={Poly ;FDV32 ;FDV35 ;LDR}
Ep_rev_P	Épaisseur du panneau de revêtement du plafond	m	Discrète	Ep_rev_P={0,013;0,026;0,039}
Type_rev	Type de panneau de revêtement	-	Nominale	Type_rev={gypse ;gypse cellulose}
Ep_isol_PB	Épaisseur de l'isolant du plancher bas	m	Continue	Ep_isol_PB={0;0,05}
Type_isol_PB	Type d'isolant du plancher bas	-	Nominale	Type_isol_PB={PSE1;PSE2}

Variable relative aux cloisons internes (CI)

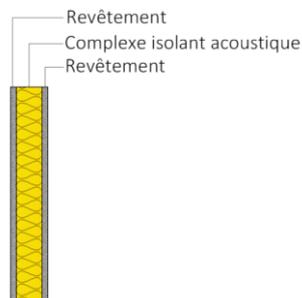


Figure 41 : Illustration de la composition de la cloison interne

L'ensemble des variables envisagées concernant la composition des cloisons internes et leur domaine de variation sont explicités dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Description des variables relatives aux cloisons intermédiaires

VARIABLES	DESCRIPTION	UNITE	TYPE DE VARIABLE	DOMAINE DE VARIATION OU VALEUR
Ep_rev_CI	Épaisseur du panneau de revêtement	m	Discrète	Ep_rev_CI={0,013;0,026;0,039}
Type_rev	Type de panneau de revêtement	-	Nominale	Type_rev={gypse ;gypse cellulose}
Type_isol_int	Matériau de l'isolant intérieur	-	Nominale	Type_isol_int={Poly ;FDV32 ;FDV35 ;LDR}

Variables relatives aux fenêtres (F)

Les variables relatives aux fenêtres concernent le type de fenêtre (triple vitrage (TV), double vitrage (DV) et double vitrage avec traitement solaire (DVsol)) et les dimensions des protections solaires (profondeur des casquettes et des masques solaires). L'ensemble des variables envisagées concernant la composition des fenêtres et la dimension des protections solaires sont explicités dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Description des variables relatives aux fenêtres et aux protections solaires

VARIABLES	DESCRIPTION	UNITE	TYPE DE VARIABLE	DOMAINE DE VARIATION OU VALEUR
Type_fen_S	Type de fenêtre Sud	-	Nominale	Type_fen_S ²⁹ = {DV ;DVsol ;TV}
Type_fen_O	Type de fenêtre Ouest et Nord	-	Nominale	Type_fen_O ²⁹ = {DV ;DVsol ;TV}
Prof_c	Profondeur des protections solaires	m	Continue	1,5≤Prof_c≤2,5

III.5.b Sélection des variables significatives

La modélisation des fonctions-objectif relatives au confort vibratoire des planchers et aux objectifs environnementaux passent par des formulations analytiques simples ne nécessitant pas la réduction du nombre de variables de conception envisagées. En revanche, la modélisation des fonctions-objectif de thermique nécessite le recours à des modèles de calculs numériques de simulation thermique dynamique. Dans cette étude il est proposé de substituer ces modèles numériques complexes par des modèles analytiques simples et précis, des métamodèles, dont la construction est détaillée dans le Chapitre IV. Pour cela, il est nécessaire de sélectionner les variables significatives parmi les variables de conception envisagées. Des analyses de sensibilité ont donc été effectuées pour déterminer l'influence des variables de conception nécessaires à l'évaluation des besoins de chauffage et des degrés-heure d'inconfort thermique estival.

Description et détermination des grandeurs d'intérêt

L'évaluation précise des besoins de chauffage et du confort thermique nécessitent le recours à des modèles de simulation thermique dynamique. Ces modèles prennent en compte toutes les variables d'entrée du bâtiment, tels que les caractéristiques thermiques des matériaux, les données météorologiques annuelles, les périodes d'occupation, les usages (puissances dissipées) et les renouvellements d'air. Sont alors considérés les apports solaires, les apports internes, les échanges thermiques par conduction, convection et rayonnement, l'inertie

²⁹ Trois types de fenêtre : triple vitrage (TV), double vitrage (DV) et double vitrage avec traitement solaire (DVsol)

thermique des différentes zones, ainsi que les échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur. De nombreux logiciels d'évaluation énergétique du bâtiment existent et la plupart sont répertoriés sur le site internet américain de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables (EERE 2015). À titre d'exemple, les logiciels suivants peuvent être cités COMFIE-PLEIADE, TAS, TRNSYS, ECOTECT, DOE-2, EnergyPlus, etc. Ces logiciels font l'objet de multiples études comparatives (Hong et al. 2000; Crawley et al. 2008). D'après Hong et al., trois facteurs essentiels sont à considérer selon l'utilisateur. En premier lieu, l'outil doit répondre aux besoins et objectifs fixés. Le second facteur de décision est relatif au budget. Le dernier facteur est la disponibilité des installations. Hong et al. donnent également les aspects à évaluer pour définir la performance d'un logiciel. L'un de ces aspects étudie les capacités de calcul du logiciel telles que les algorithmes de calculs utilisés, les champs d'application, la vitesse de calcul, la précision et son extensibilité. Un autre aspect est lié à l'ergonomie de l'outil qui concerne sa facilité de prise en main, son interface de saisie des données et d'interprétation des résultats. Enfin deux autres aspects traitent de la base de données disponible et de la capacité d'échange d'information et d'interaction avec d'autres outils.

EnergyPlus est un logiciel gratuit de simulation thermique dynamique du bâtiment développé par le Département de l'énergie (DOE) et le Laboratoire National des Énergies Renouvelable (NREL) des États-Unis. Il est issu de la fusion de deux programmes de simulation DOE-2 et BLAST. Le modèle thermique d'EnergyPlus a été validé par le BESTests conçu par l'Agence Internationale de l'Énergie (IAE). Ce logiciel étant libre, il est largement employé en bureau d'études comme en recherche. Il ne possède pas d'interface graphique évoluée. Toutefois, il intègre des structures de données d'entrée et de sortie bien définies facilitant le développement d'outils tiers de saisie et d'exploitation. Les données d'entrées sont intégrées à un fichier de format « .idf » (*Input Data File*) comprenant toutes les caractéristiques du bâtiment (géométrie, composition, scénarios, systèmes énergétiques, etc.) et un fichier météo sous le format « .epw » (*EnergyPlus Weather*).

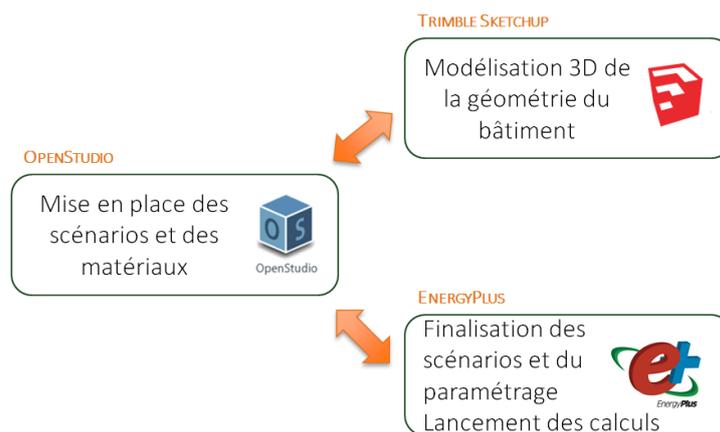


Figure 42 : Plateforme logicielle de simulation thermique dynamique composée d'EnergyPlus, Trimble Sketchup et OpenStudio

Ainsi il peut être utilisé et couplé gratuitement au logiciel d'esquisse 3D Trimble Sketchup et peut facilement être couplé à des codes de calculs divers. Le logiciel OpenStudio développé par le NREL ajoute une interface de saisie conviviale, et fait le lien entre le logiciel d'esquisse Trimble Sketchup et le moteur de calcul d'EnergyPlus (Figure 42).

En résumé, EnergyPlus répond aux objectifs fixés. Il est gratuit, offre une prise en main facilitée par une interface spécifique et peut facilement interagir avec d'autres logiciels et programmes de calcul. Il est donc parfaitement adapté à ces travaux et a donc été privilégié.

La simulation thermique dynamique permet d'obtenir les puissances de chauffage nécessaires aux consignes de température préalablement fixées. Ces puissances peuvent être obtenues avec un pas de temps minimum de 10 minutes selon le choix de l'utilisateur. Le besoin de chauffage annuel est une sortie proposée par l'outil. Dans cette approche le besoin de chauffage est ramené au mètre carré de surface habitable.

$$Bch = \frac{Bch_{\text{annuel}} \times 2,778 \times 10^{-7}}{Shab} \quad \text{[III.10]}$$

où :

- Bch est le besoin de chauffage annuel surfacique en kWh/m².an ;
- Bch_{annuel} est le besoin de chauffage annuel en J ;
- Shab est la surface habitable en m².

L'évaluation des températures opératives intérieures au pas de temps horaire permet également d'estimer le confort thermique selon la méthode des degrés-heures basée sur une température seuil ou sur une plage correspondante au confort adaptatif. Une autre sortie proposée par EnergyPlus concerne les indices PMV et PPD. Les objectifs choisis visent l'obtention d'un confort thermique estival adéquat sans utiliser de climatisation. La méthode de Fanger est donc inadaptée (Boulet 2009). Pour l'optimisation du système constructif, c'est donc une méthode basée sur le calcul des degrés-heures qui sera conservée.

La température de référence (température seuil) considérée dépend du type de bâtiment étudié. Elle peut être adaptative et évolutive au cours du temps. L'indicateur *DH* qui représente l'accumulation par heure de l'écart de la température opérative par rapport à une température de référence est défini dans l'équation [III.1] page 85. Dans l'étude de cas, seul le confort thermique du logement situé au niveau supérieur du bâtiment sera considéré (conditions les plus défavorables). Les *DH* sont calculés pour une température de référence de 26°C. Considérant que l'occupation peut être variable, toute la période estivale a été considérée avec et sans occupation.

Variables et lois de distribution associées

Les variables considérées pour l'analyse de sensibilité sont des variables quantitatives continues associées à des lois de distribution uniformes (Tableau 12). Quelques hypothèses et regroupements de variables ont alors été effectués :

- L'entraxe, la hauteur et l'épaisseur des solives ainsi que le nombre de renforts des planchers intermédiaires de type solives ne sont pas des variables nécessaires au calcul des besoins de chauffage et des degrés-heure d'inconfort thermique estival. Elles n'ont donc pas été considérées dans l'analyse de sensibilité.

- L'épaisseur des panneaux de bois est calculée en fonction du nombre de plis, de leur épaisseur et du type de paroi selon l'équation [III.11] pour les planchers intermédiaires et l'équation [III.12] pour les murs.

<p>Si $Type_PI = CLT$ et $nb_plis_PI = 5$ alors :</p> <p>pour $nb_plis_PI = 5$: $Ep_CLT_PI = 2 \times h_plis_L_PI + 2 \times h_plis_T_PI + h_plis_L_PI$</p> <p>sinon : $Ep_CLT_PI = \frac{(nb_plis_PI + 1) \times h_plis_L_PI + (nb_plis_PI - 1) \times h_plis_T_PI}{2}$</p> <p>Si $Type_PI = Solives$ alors : $Ep_CLT_PI = Ep_OSB_PI = 0,022\text{ m}$</p> <p>Si $Type_PI = Beton$ alors : $Ep_CLT_PI = 0$</p>	[III.11]
---	----------

<p>Si $Type_ME = CLT$ alors :</p> $Ep_CLT_ME = \frac{(nb_plis_ME + 1) \times h_plis_L_ME + (nb_plis_ME - 1) \times h_plis_T_ME}{2}$ <p>avec $nb_plis_ME = 3$</p> <p>Si $Type_ME = Ossature$ alors : $Ep_CLT_ME = Ep_OSB = 0,02\text{ m}$</p>	[III.12]
---	----------

- Les variables résultantes du type d'isolant intérieur sont sa masse volumique, sa capacité thermique et sa conductivité thermique.
- Les variables résultantes du type de revêtement sont sa masse volumique et sa capacité thermique.
- Pour l'isolant intérieur et le revêtement intérieur, la capacité thermique est fixée à une valeur nominale de manière à évaluer l'influence du produit $\rho \times C_p$ en ne faisant varier que la masse volumique de l'isolant selon l'équation [III.13] et les valeurs du Tableau 11.
- La variable résultante du type de bois utilisé est sa masse volumique.
- La conductivité thermique des isolants du mur est agrégée en une conductivité thermique équivalente tenant compte des ponts thermiques intégrés induits par les montants d'ossature. Cette conductivité thermique est calculée suivant l'équation [III.14].

$\rho_{VB}^{(C_{pnom})} = \frac{\rho_{VB} \times C_{pVB}}{C_{pnom}} \text{ et } \rho_{VH}^{(C_{pnom})} = \frac{\rho_{VH} \times C_{pVH}}{C_{pnom}}$	[III.13]
<p>où :</p> <ul style="list-style-type: none"> - ρ_{VB} et ρ_{VH} sont les valeurs basses et hautes de la masse volumique de l'isolant ou du revêtement intérieur ; - C_{pVB} et C_{pVH} sont les valeurs basses et hautes de la chaleur spécifique de l'isolant ou du revêtement intérieur ; - C_{pnom} est la chaleur spécifique nominale ; - $\rho_{VB}^{(C_{pnom})}$ et $\rho_{VH}^{(C_{pnom})}$ sont les valeurs basses et hautes de la masse volumique du matériau correspondante à C_{pnom}. 	

Tableau 11 : Valeurs basses et valeurs hautes de la masse volumique et de la capacité thermique des isolants et des revêtements intérieurs.

	ρ_{VB} [kg/m ³]	ρ_{VH} [kg/m ³]	$C_{P_{VB}}$ [J/kg.K]	$C_{P_{VH}}$ [J/kg.K]	$C_{\rho_{nom}}$ [J/kg.K]	$\rho_{VB}^{(C_{P_{nom}})}$ [kg/m ³]	$\rho_{VH}^{(C_{P_{nom}})}$ [kg/m ³]
Isolant intérieur	10	300	900	1400	1150	8	365
Revêtement	800	1250	750	1150	950	630	1515

- De même, la conductivité thermique des isolants de la toiture est agglomérée en une conductivité thermique équivalente tenant compte des ponts thermiques intégrés induits pas les solives selon l'équation [III.14].

$$\lambda_{1eq} = \frac{\lambda_{bois} \times \lambda_1}{\lambda_1 \times Tx_{bois} + \lambda_{bois} \times Tx_{isol}} \quad [III.14]$$

$$\lambda_{12eq} = \frac{E_{p1} + E_{p2}}{\frac{E_{p1}}{\lambda_{1eq}} + \frac{E_{p2}}{\lambda_2}}$$

où :

- Tx_{bois} et Tx_{isol} sont respectivement la part de bois et d'isolant présents dans la couche d'isolant 1 ;
- λ_1 , λ_2 et λ_{bois} sont les conductivités thermiques des isolants 1,2 et du bois ;
- E_{p1} et E_{p2} sont les épaisseurs d'isolant ;
- λ_{1eq} et λ_{12eq} sont respectivement la conductivité équivalente d'un isolant avec ponts thermiques intégrés et la conductivité thermique équivalente de deux isolants homogènes.

- Les épaisseurs de revêtement de plafond et de cloison interne sont égales $Ep_{rev_Cl}=Ep_{rev_P}$.
- La variable résultante du type d'isolant en plancher bas est sa conductivité thermique.
- Une variable supplémentaire a été ajoutée à l'analyse de sensibilité. Il s'agit de la masse volumique du panneau CLT. L'exploitation des feuillus pour des bois d'ingénierie permettrait d'augmenter la masse volumique des produits de seconde de transformation par rapport à l'utilisation de résineux. Il apparait ici intéressant d'étudier l'influence des essences de bois sur les besoins de chauffage et les degrés-heure d'inconfort estival par rapport aux autres variables considérées.

Tableau 12 : Variables d'entrées prises en compte pour l'analyse de sensibilité sur les besoins de chauffage et les degrés-heure d'inconfort estival du logement supérieur

	NUMERO	DESCRIPTION	VARIABLE	VB	VH	UNITE
PI	1	Épaisseur de la chape béton des planchers intermédiaires	Ep_chape_PI	0	0,2	[m]
	2	Épaisseur du panneau bois des planchers intermédiaires	Ep_CLT_PI	0	0,22	[m]
	3	Conductivité thermique équivalente des isolants du mur extérieur	Lambda_ME_eq	0,03	0,055	[W/(m.K)]
ME	4	Épaisseur de l'isolation intérieure du mur extérieur	Ep_isol_ME_int	0	0,05	[m]
	5	Épaisseur de l'isolation extérieure du mur extérieur	Ep_isol_ME_ext	0,1	0,24	[m]
	6	Épaisseur du panneau de bois du mur	Ep_CLT_ME	0,02	0,12	[m]
	7	Épaisseur du panneau de revêtement intérieur du mur extérieur	Ep_rev_ME	0	0,04	[m]
T	8	Conductivité thermique équivalente des isolants de la toiture	Lambda_T_eq	0,03	0,06	[W/(m.K)]
	9	Surépaisseur d'isolant en toiture	Ep_isol_T_int	0	0,13	[m]
PB	10	Épaisseur de l'isolant en plancher bas	Ep_isol_PB	0,06	0,12	[m]
	11	Conductivité thermique de l'isolant du plancher bas	Lambda_isol_PB	0,025	0,035	[W/(m.K)]
T/CI	12	Épaisseur du panneau de revêtement des plafonds et des cloisons internes	Ep_rev_CI	0,013	0,04	[m]
T/CI/ME/PI	13	Masse volumique des panneaux et chaleur spécifique des revêtements intérieurs pour Cp=1150 J/(Kg.m3)	Rho_rev	630	1515	[Kg/m ³]
	14	Masse volumique des isolants intérieurs pour Cp=950 J/(Kg.m3)	Rho_isol	8	365	[Kg/m ³]
ME/PI	15	Masse volumique des panneaux de bois	Rho_CLT	350	840	[Kg/m ³]
F	16	Facteur solaire de la fenêtre Sud	Sw_S	0,25	0,55	[-]
	17	Coefficient de déperdition thermique de la fenêtre Sud	Uw_S	0,8	1,8	[W/(m ² .K)]
	18	Facteur solaire des fenêtres Nord et Ouest	Sw_O	0,25	0,55	[-]
	19	Coefficient de déperdition thermique des fenêtres Nord et Ouest	Uw_O	0,8	1,8	[W/(m ² .K)]
	20	Profondeur de la casquette solaire et des masques associés	Prof_c	1	2.5	[m]

Choix des méthodes d'analyse de sensibilité

Selon Iooss (2011): « l'analyse de sensibilité (AS) permet notamment de déterminer quelles sont les variables d'entrée du modèle qui contribuent le plus à une quantité d'intérêt donnée en sortie du modèle, quelles sont celles qui n'ont pas d'influence et quelles sont celles qui interagissent au sein du modèle ». Selon Saltelli et Annoni (2010), les concepteurs utilisent les méthodes d'analyse de sensibilité pour avoir accès aux informations suivantes :

- Vérifier si le modèle représente correctement un phénomène physique ou le système étudié.
- Déterminer les facteurs d'entrée contribuant majoritairement aux incertitudes de la sortie, ces facteurs méritant alors d'être bien connus pour réduire l'incertitude sur la réponse simulée.
- Réduire la complexité du modèle en éliminant les paramètres d'entrée qui ont un effet négligeable sur la sortie, une valeur nominale donnée par défaut pour ces paramètres est suffisant.
- Identifier des zones critiques dans l'espace des paramètres d'entrée qui génèrent des sorties irréalistes.
- Déterminer les interactions entre les paramètres, ce qui permet de s'intéresser à un groupe de paramètres plutôt qu'à des paramètres isolés.

Contrairement aux méthodes d'analyse de sensibilité « locales », les méthodes d'analyse de sensibilité « globales » sont appliquées à l'ensemble du domaine de variation des variables d'entrées considérées. Il existe de nombreuses méthodes d'analyse de sensibilité globale dont une partie est représentée et classée dans la Figure 43 selon la complexité/régularité du modèle et le coût nombre d'évaluations du modèle (Iooss 2011). Cette figure permet de sélectionner un type d'AS adapté au modèle traité, tout en minimisant le nombre d'évaluations nécessaires. Deux grandes catégories de méthodes se distinguent : les méthodes de criblage et les méthodes de décomposition de la variance.

Les méthodes de criblage sont adaptées pour des modèles numériques de dimensions élevées avec plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de variables d'entrée et dont les simulations sont chronophages. Ces méthodes permettent notamment de classer les variables de conception par ordre d'influence. Ainsi pour des modèles au comportement linéaire, des méthodes de criblage de type OAT (*One At a Time*) ou un plan supersaturé suffisent à caractériser l'influence des entrées du système. Cependant, il est difficile de qualifier à priori la complexité/régularité d'un modèle numérique de bâtiment, étant donné le nombre considérable de variables en entrée, la nature de leur action sur une variable d'intérêt, ainsi que le niveau d'interaction entre elles. La méthode de Morris (Morris 1991) se révèle être la moins coûteuse en nombre d'évaluation pour l'analyse de systèmes non monotone et discontinu. C'est la méthode de criblage la plus utilisée pour l'analyse énergétique des bâtiments (Tian 2013).

Les méthodes basées sur la décomposition de la variance consistent à déterminer la responsabilité de chaque variable et groupe de variables en interactions sur la variance totale de la sortie d'intérêt du modèle numérique. Par exemple, la méthode de calcul des indices de Sobol (Sobol 1993) est adaptée à l'analyse de sensibilité globale de modèles non monotones et discontinus et est donc adaptée à l'utilisation d'un modèle numérique en boîte noire. L'inconvénient principal de cette méthode est le nombre élevé d'évaluations du modèle requis (Iooss 2011). Par exemple la technique de Monte Carlo nécessite un nombre d'évaluations du modèle de l'ordre de 2^n (Sudret 2008; Crestaux et al. 2009), ce qui pour un modèle comportant 20 variables nécessite une évaluation de plus d'un million de solutions. Une alternative consiste à utiliser la construction d'un métamodèle pour calculer les indices de Sobol de manière plus efficace (Iooss 2011).

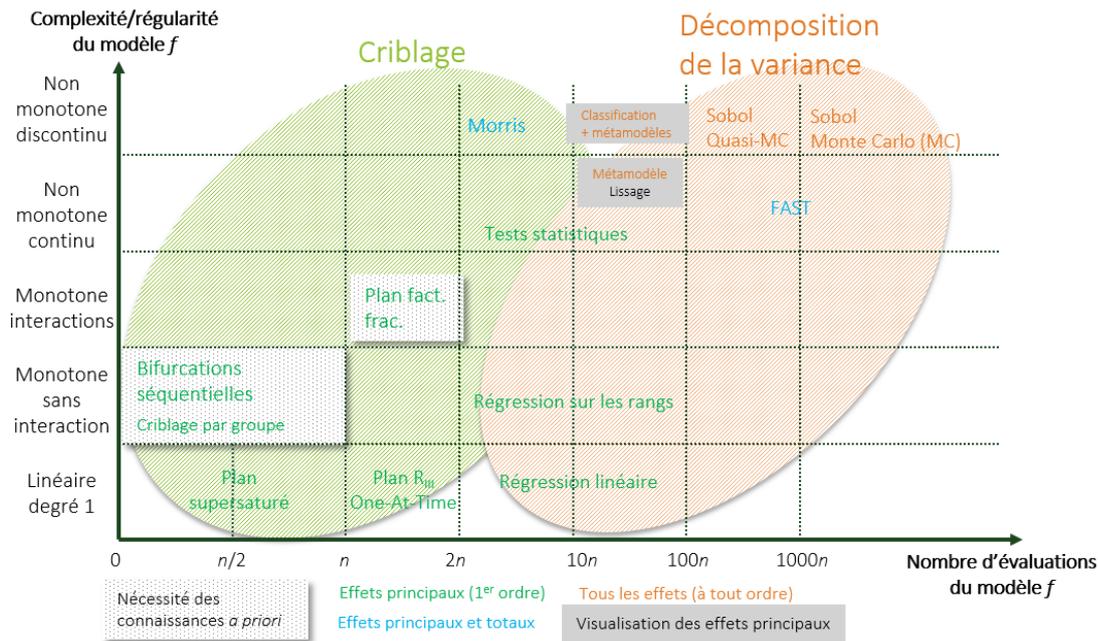


Figure 43 : Classement des méthodes d'analyse de sensibilité (d'après looss 2011)

Dans une étude visant à analyser la fiabilité d'un outil de simulation thermique dynamique (COMFIE) par comparaison à des mesures expérimentales Recht et al. (2014) proposent une démarche de validation empirique. Dans un premier temps une grandeur d'intérêt est définie. Celle-ci est un indicateur d'écart entre la température du modèle simulée et de la maison expérimentale mesurée. Une analyse de sensibilité a alors été menée via un criblage par la méthode de Morris sur 153 variables d'entrée à partir de 4620 évaluations. Les facteurs incertains ont alors été classés puis les 11 premiers ont été retenus. Enfin, pour quantifier la part imputable de chacun de ces 11 facteurs sur l'incertitude globale de la grandeur d'intérêt, les indices de Sobol ont été déterminés à partir de 7000 évaluations des modèles.

Dans cette étude, deux méthodes ont alors été retenues :

- La méthode de Morris, qui peut être utilisée pour réaliser un premier filtrage des paramètres incertains en fonction d'une grandeur d'intérêt (degrés-heure d'inconfort, besoin de chauffage...) lorsque le nombre de variables considérées est important (plusieurs dizaines de variables).
- Une classification des paramètres grâce aux indices de Sobol calculés à partir de métamodèles.

Méthode de Morris

La méthode de Morris se base sur la répétition d'un plan OAT appliqué à l'ensemble des variables d'entrée (Morris 1991). Les intervalles de variation de chacune des n variables sont discrétisés en un nombre convenable de niveaux Q . La méthode de Morris consiste alors à répéter r fois un plan OAT. Pour chaque répétition i ($i = 1...r$) un point de départ est tiré aléatoirement puis des variations élémentaires δ proportionnelles à $1/(Q-1)$ sont réalisées successivement. La méthode requiert $r \times (n+1)$ évaluations du modèle. Les variations sont

tirées de manière « pseudo-aléatoire » dans les intervalles d'incertitude selon une densité de probabilité uniforme. Plus le nombre de répétitions est élevé, plus l'analyse de sensibilité sera précise, mais plus le nombre de simulations requis et donc le temps nécessaire à la réalisation seront importants. À chaque répétition i les effets élémentaires (variation de la variable d'intérêt f) sont calculés pour chaque variable j selon l'équation [IV.9].

$$dx_j^{(i)} = \frac{f(x_1^{(i)}, \dots, \pm\delta, \dots, x_n^{(i)}) - f(x_1^{(i)}, \dots, x_j^{(i)}, \dots, x_n^{(i)})}{\delta} \quad [\text{III.15}]$$

où $dx_j^{(i)}$ est l'effet élémentaire de la variable X_j lorsque celle-ci varie de $\pm\delta$.

La moyenne des valeurs absolues des effets μ_j^* et l'écart type des effets σ_j représentant respectivement l'effet de la variable x_j sur la variable d'intérêt, et son interaction avec les autres variables sont ensuite calculés selon les équations [III.16] et [III.17].

$$\mu_j^* = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r |dx_j^{(i)}| \quad [\text{III.16}]$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (dx_j^{(i)} - \mu_j^*)^2} \quad [\text{III.17}]$$

avec μ_j^* la moyenne des effets

Plus μ_j^* est élevée, plus la variable i influence la grandeur d'intérêt. Plus σ_j est élevé, plus les effets de non-linéarité et d'interactions avec les autres variables sont marqués.

Il est finalement possible de hiérarchiser l'influence des paramètres sur la grandeur d'intérêt en calculant et en normalisant la distance euclidienne D_j^* de chaque variable selon l'équation [III.18].

$$D_j^* = \frac{d_j^* - \min_j(d_j^*)}{\max_j(d_j^*) - \min_j(d_j^*)} \quad [\text{III.18}]$$

où $d_j^* = \sqrt{(\mu_j^*)^2 + (\sigma_j)^2}$ est la distance euclidienne entre l'origine et le point (μ_j^*, σ_j)

Les variables ont alors été classées par ordre d'influence sur les deux grandeurs d'intérêt. Pour les besoins de chauffage, les 20 variables présentées dans le Tableau 11 sont considérées. Pour les degrés-heure d'inconfort estival du logement situé au niveau supérieur les variables relatives au plancher bas ne sont pas considérées. Les caractéristiques du criblage mis en œuvre sont : $r=30$ et $Q=6$. Il a donc été nécessaire de réaliser 630 évaluations pour les besoins de chauffage et 570 évaluations pour les degrés-heure d'inconfort estival.

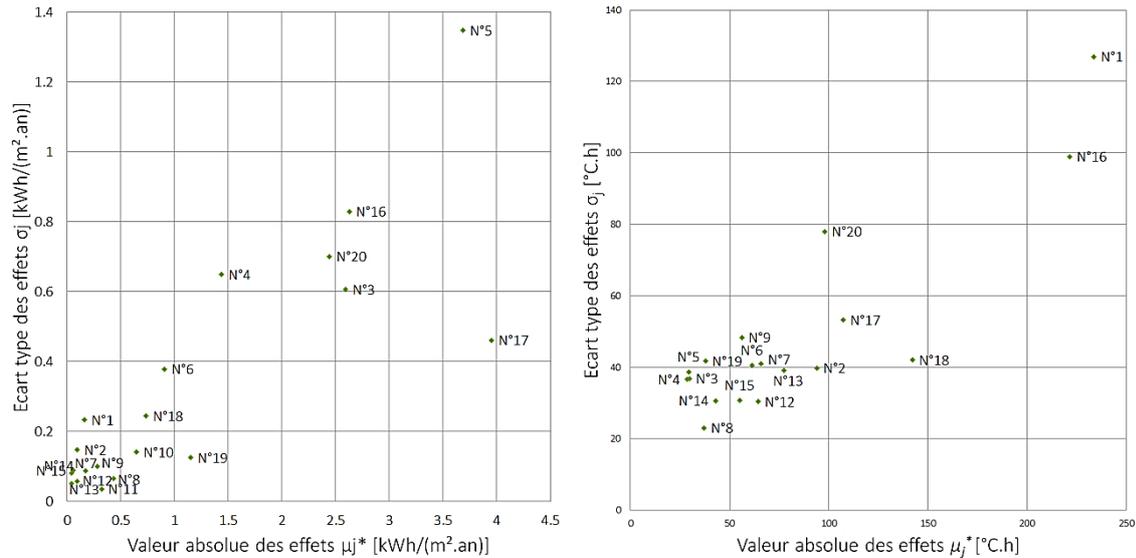


Figure 44 : Résultats de la méthode Morris ($r=30$ avec 6 niveaux) : besoins de chauffage (gauche) et degrés-heure d'inconfort estival (droite)

Les résultats de la méthode Morris sont représentés sur la Figure 44 avec les valeurs absolues des effets de chaque paramètre en abscisse et l'écart type des effets de chaque paramètre en ordonnée. Les variables sont numérotées selon le Tableau 11. Cette représentation permet de qualifier rapidement et visuellement l'influence de chacun des paramètres sur les grandeurs d'intérêt.

Pour les besoins de chauffage :

- les variables N°1 (Ep_{chape_PI}), N°2 (Ep_{CLT_PI}), N°7 (Ep_{rev_ME}), N°8 (Λ_{T_eq}), N°9 ($Ep_{isol_T_int}$), N°10 (Ep_{isol_PB}), N°11 (Λ_{isol_PB}), N°12 (Ep_{rev_CI}), N°13 (ρ_{rev}), N°14 (ρ_{isol}), N°15 (ρ_{CLT}), N°18 (Sw_O) peuvent être considérées comme peu influentes ;
- la variable N°6 (Ep_{CLT_ME}) possède des effets de non-linéarité ou une forte interaction avec les autres paramètres, mais une influence propre faible ;
- la variable N°19 (Uw_O) possède une faible interaction avec les autres paramètres, mais une influence propre moyenne ;
- les variables N°3 (Λ_{ME_eq}), N°4 ($Ep_{isol_ME_int}$), N°5 ($Ep_{isol_ME_ext}$), N°16 (Sw_S), N°17 (Uw_S), N°20 ($Prof_c$) possèdent des effets de non-linéarité ou une forte interaction avec les autres paramètres et une influence propre élevée.

Pour les degrés-heure d'inconfort estival :

- les variables N°3 (Λ_{ME_eq}), N°4 ($Ep_{isol_ME_int}$), N°5 ($Ep_{isol_ME_ext}$), N°8 (Λ_{T_eq}), N°14 (ρ_{isol}), et N°19 (Uw_O) peuvent être considérées comme peu influentes ;
- les variables N°6 (Ep_{CLT_ME}), N°7 (Ep_{rev_ME}), N°9 ($Ep_{isol_T_int}$), N°12 (Ep_{rev_CI}), N°13 (ρ_{rev}) et N°15 (ρ_{CLT}) possèdent une faible interaction avec les autres paramètres, mais une influence propre moyenne ;

- Les variables, N°1 (Ep_chape_PI), N°2 (Ep_CLT_PI), N°16 (Sw_S), N°17 (Uw_S), N°18 (Sw_O) et N°20 (Prof_c) possèdent des effets de non-linéarité ou une forte interaction avec les autres paramètres et une influence propre élevée.

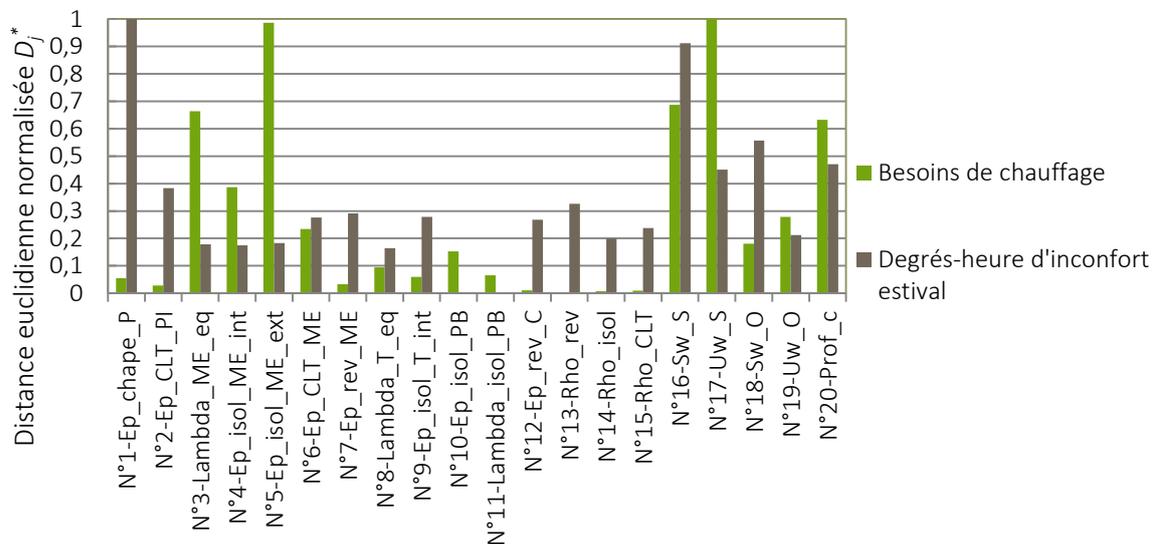


Figure 45 : Distance euclidienne normalisée des paramètres permettant de hiérarchiser leur influence sur les besoins de chauffage et les degrés-heures d'inconfort

Les paramètres les plus influents ayant une distance euclidienne normalisée supérieure à 0,2 (Figure 45) sont (du plus influent au moins influent) :

- pour les besoins de chauffage : N°17 (Uw_S), N°5 (Ep_isol_ME_ext), N°16 (Sw_S), N°3 (Lambda_ME_eq), N°20 (Prof_c), N°4 (Ep_isol_ME_int), N°19 (Uw_O) et N°6 (Ep_CLT_ME) ;
- pour les degrés-heure d'inconfort estival : N°1 (Ep_chape_P), N°16 (Sw_S), N°18 (Sw_O), N°20 (Prof_c), N°17 (Uw_S), N°2 (Ep_CLT_PI), N°13 (Rho_rev), N°7 (Ep_rev_ME), N°9 (Ep_isol_T_int), N°6 (Ep_CLT_ME), N°12 (Ep_rev_C) et N°15 (Rho_CLT).

Certaines variables influencent fortement à la fois les besoins de chauffage et les degrés-heures d'inconfort estival comme les variables N°16 (Sw_S), N°17 (Uw_S) et N°20 (Prof_c). D'autres n'influencent que les besoins de chauffage comme la variable N°5 (Ep_isol_ME_ext) ou que les degrés-heure d'inconfort estival comme la variable N°1 (Ep_chape_P). Globalement, il y a peu de variables influentes pour les besoins de chauffage comparativement au degré-heure d'inconfort estival. Il est donc plus délicat de réduire le nombre de variables à considérer pour cette seconde grandeur d'intérêt.

Méthode des coefficients de Sobol

Les coefficients de Sobol nommés « mesures d'importance basées sur la variance » ou indices de Sobol sont compris entre 0 et 1 et leur somme vaut 1. Ils sont particulièrement faciles à interpréter en termes de pourcentage de la variance de la réponse. Leur calcul repose sur l'hypothèse qu'un modèle non linéaire et non monotone peut être décomposé en une somme

de fonctions élémentaires orthogonales. Le modèle se décompose donc de façon unique en une suite de fonctions de dimension croissante selon l'équation [III.19](Hoeffding 1948).

$$f(x_1, \dots, x_n) = f_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{i<j}^n f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{12\dots n}(x_1, \dots, x_n) \quad [III.19]$$

où :

- f_0 est une constante ;
- n est le nombre de variables

D'autre part, si les variables x_i sont aléatoires et mutuellement indépendantes, cette équation permet d'obtenir la décomposition de la variance fonctionnelle ou représentation ANOVA (ANALYSIS OF VARIANCE) fonctionnelle (Sobol 1993) :

$$V(Y) = \sum_{i=1}^n V_i(Y) + \sum_{i<j}^n V_{ij}(Y) + \sum_{i<j<k}^n V_{ijk}(Y) + \dots + V_{12\dots n}(Y) \quad [III.20]$$

où :

- $V_i(Y)$ est la variance partielle de Y produite uniquement par les variations x_i et ainsi de suite
- avec $V_i(Y) = V[E(Y|x_i)]$, $V_{ij}(Y) = V[E(Y|x_i, x_j)] - V_i(Y) - V_j(Y)$

Les indices de Sobol peuvent être déduits à partir des équations [III.19] et [III.20]. L'effet d'une variable x_i peut être déterminé comme la part de variance de Y produite par cette variable sur la variance totale. L'indice de sensibilité du premier ordre S_i mesure alors la part de variance de sortie induite par la seule variable x_i et est obtenu selon [III.21].

$$S_i = \frac{V[E(Y|x_i)]}{V(Y)} = \frac{V_i(Y)}{V(Y)} \quad [III.21]$$

Les indices de sensibilité d'ordre supérieur allant de 2 à n sont calculés de façon similaire. Ils mesurent les effets produits par des variations communes de plusieurs variables d'entrées. Par exemple, pour l'indice de sensibilité de second ordre S_{ij} le calcul s'effectue selon l'équation [III.22].

$$S_{ij} = \frac{V_{ij}(Y)}{V(Y)} \quad [III.22]$$

Lorsque le nombre de paramètres est important, le nombre d'indices augmente de manière exponentielle. Homma et Saltelli (1996) introduisent alors l'indice de sensibilité totale S_{T_i} pour exprimer tous les effets d'une variable d'entrée sur la sortie. Il s'agit de la somme de tous les indices de sensibilité faisant intervenir la variable x_i seule et par interaction. L'indice S_{T_i} exprime ainsi l'influence de chaque variable sur sa plage de variation corrélée avec la variation des autres variables.

$$S_{T_i} = S_i + \sum_{j \neq i} S_{ij} + \sum_{j \neq i, k \neq i, j < k} S_{ijk} + \dots + S_{1\dots i \dots n} = \sum_{l \in \#i} S_l \quad [III.23]$$

où $\#i$ représente tous les sous-ensembles d'indices contenant l'indice i .

Les indices du premier ordre et d'ordre totaux obtenus permettent alors d'obtenir une idée plus précise du classement des paramètres les plus importants.

Dans cette étude les indices de Sobol ont été obtenus par décomposition en polynômes du chaos tel que détaillé dans le Chapitre IV. Le nombre de simulations requises pour obtenir les indices de Sobol de premier ordre et totaux se situe entre 500 et 1000 évaluations des modèles pour les besoins de chauffage et les degrés-heure d'inconfort estival (Figure 56). Les indices de Sobol obtenus sont représentés dans la Figure 46 pour les besoins de chauffage et la Figure 47 pour les degrés-heure d'inconfort. Que ce soit pour les besoins de chauffage ou les degrés-heure d'inconfort estival, les indices de Sobol de premier ordre et totaux sont très proches et confèrent sensiblement le même classement aux paramètres. Il n'y a donc pas d'interaction notable entre les paramètres et il n'est pas utile de s'intéresser aux indices d'ordres intermédiaires. Cette non-interaction entre les variables peut résulter de l'objet d'étude, du choix des variables et de leur domaine de variation mais peut également être due aux limites du modèle de simulation thermique dynamique employé.

Les paramètres les plus influents ayant un indice de Sobol Total qui expliquent plus de 1% de la variance de la grandeur d'intérêt sont (du plus influent au moins influent) :

- Pour les besoins de chauffage : N°16 (Sw_S), N°17 (Uw_S), N°5 (Ep_isol_ME_ext), N°3 (Lambda_ME_eq), N°20 (Prof_c), N°4 (Ep_isol_ME_int), N°19 (Uw_O) et N°6 (Ep_CLT_ME),
- Pour les degrés-heure d'inconfort estival : N°16 (Sw_S), N°1 (Ep_chape_P), N°20 (Prof_c), N°17 (Uw_S), N°18 (Sw_O), N°13 (Rho_rev), N°2 (Ep_CLT_PI), N°12 (Ep_rev_C), N°15 (Rho_CLT) et N°7 (Ep_rev_ME).

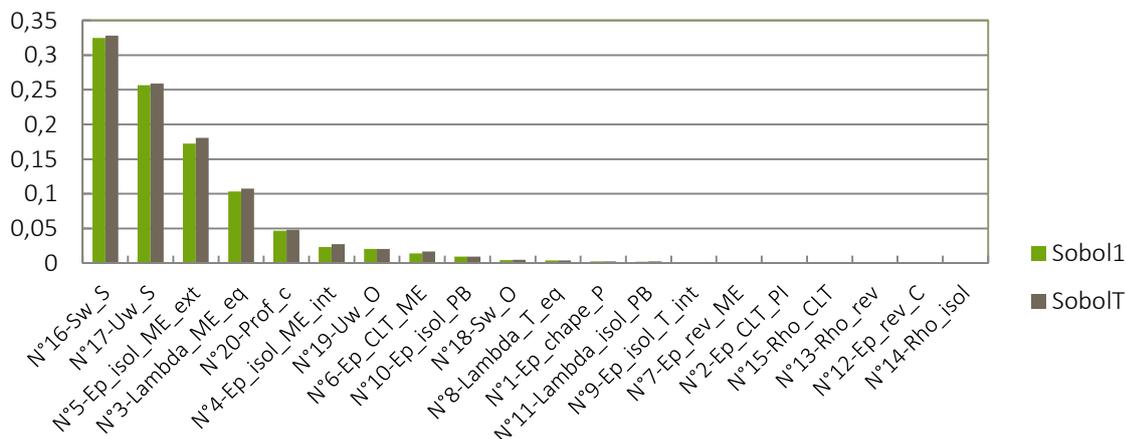


Figure 46 : Indices de Sobol de premier ordre (Sobol1) et d'ordre total (SobolT) obtenus pour les besoins de chauffage

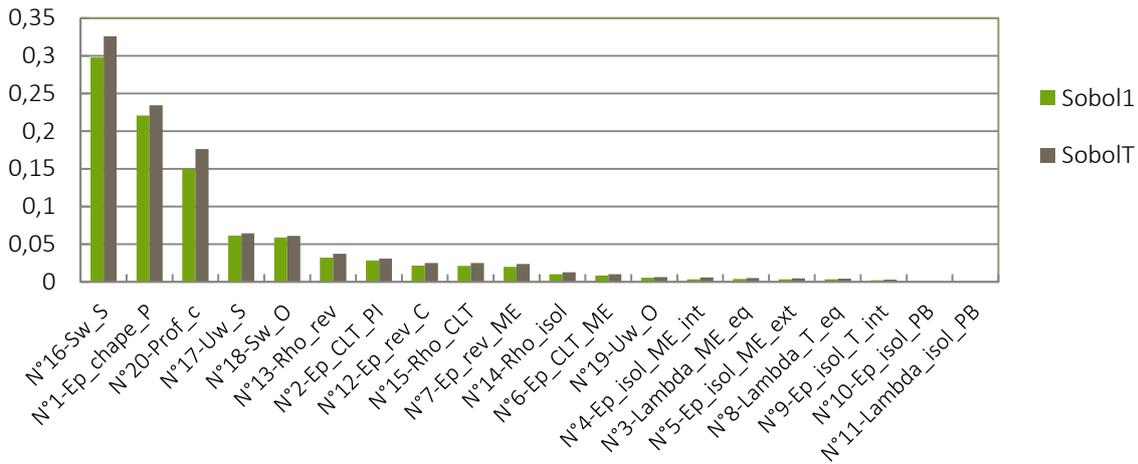


Figure 47 : Indices de Sobol de premier ordre (Sobol1) et d'ordre total (SobolT) obtenus pour les degrés-heure d'inconfort estival

La variance des besoins de chauffage du bâtiment est principalement due à des paramètres relatifs à la résistance thermique de l'enveloppe (N°17 (Uw_S), N°5 (Ep_isol_ME_ext), N°3 (Lambda_ME_eq), N°4 (Ep_isol_ME_int), N°19 (Uw_O) et N°6 (Ep_CLT_ME)) et aux apports solaires (N°16 (Sw_S), N°20 (Prof_c)).

La variance des degrés-heure d'inconfort estival est également due à des paramètres relatifs à la résistance thermique de l'enveloppe (N°17 (Uw_S)), aux apports solaires (N°16 (Sw_S), N°20 (Prof_c), N°18 (Sw_O)), mais aussi à l'inertie thermique (N°1 (Ep_chape_Pi), N°13 (Rho_rev), N°2 (Ep_CLT_Pi), N°12 (Ep_rev_C), N°15 (Rho_CLT) et N°7 (Ep_rev_ME)).

Discussion et sélection des variables significatives

Les paramètres les plus influents sur les besoins de chauffage identifiés avec les indices de Sobol sont les mêmes que ceux identifiés par la méthode de Morris. Néanmoins, le classement varie concernant les trois premiers paramètres (Figure 48).

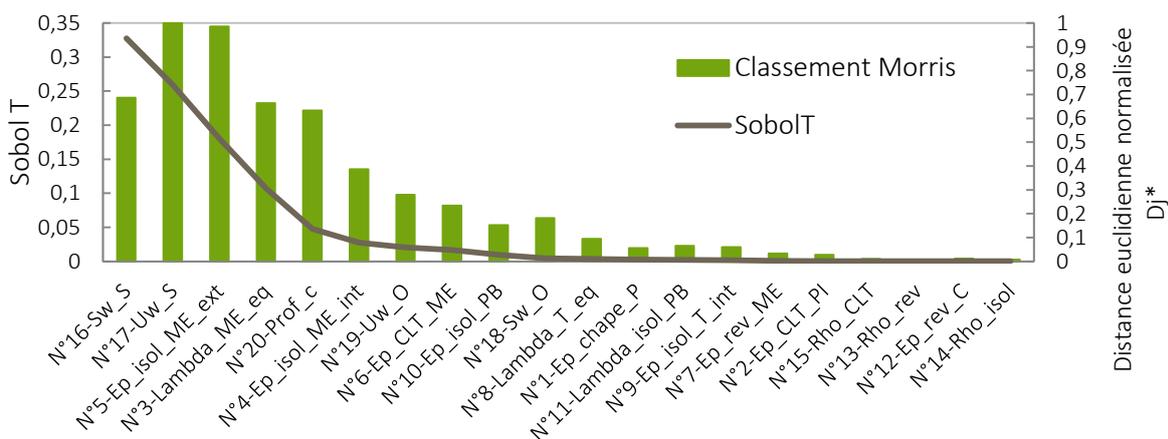


Figure 48 : Confrontation du classement des paramètres par les indices de Sobol d'ordre total (SobolT) au classement de Morris pour les besoins de chauffage

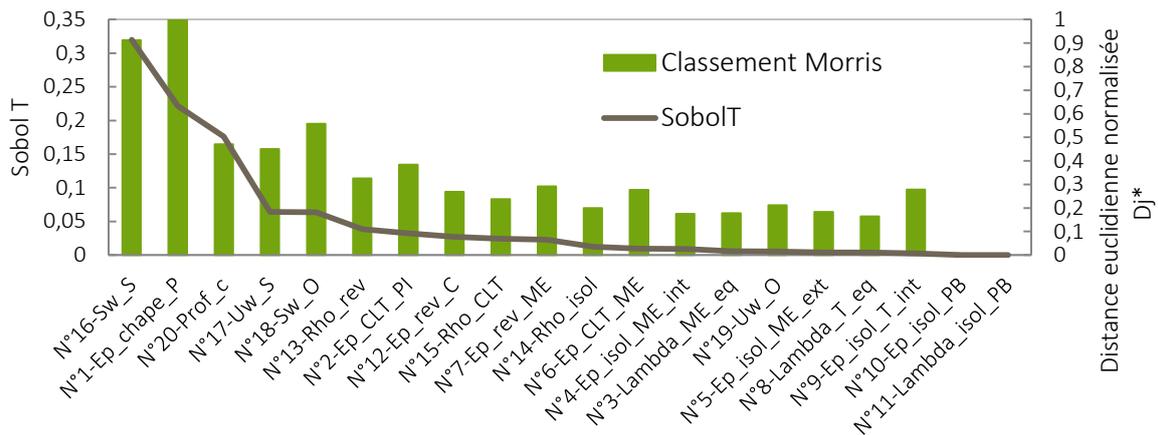


Figure 49 : Confrontation du classement des paramètres par les indices de Sobol d'ordre total (SobolT) au classement de Morris pour les degrés-heures d'inconfort

De même, les paramètres les plus influents sur les degrés-heure d'inconfort thermique sont les mêmes que ceux identifiés par la méthode de Morris hormis le N°9 (Ep_isol_T_int) et N°6 (Ep_CLT_ME) qui n'ont pas été retenus comme paramètre influant avec la méthode de Sobol. Les classements diffèrent un peu plus que pour les besoins de chauffage (Figure 49). Globalement le classement reste proche entre les deux méthodes et les variables les plus significatives identifiées avec les indices de Sobol ont également été identifiées avec la méthode de Morris. Ces résultats confirment la capacité de la méthode de Morris à filtrer les variables par ordre d'influence pour ne garder que les plus sensibles. Dans le cas d'une étude plus ambitieuse comportant un nombre de variables envisageables important (>20) l'utilisation de la méthode de Morris doit être privilégiée pour sélectionner au préalable les paramètres les plus influents avec un nombre d'évaluations restreint. Cela peut être le cas de bâtiments bois de grande hauteur où la composition des murs peut par exemple différer selon les niveaux du bâtiment, l'orientation des façades et les zones d'activité.

Les variables significatives nécessaires à la modélisation des objectifs de besoin de chauffage et des degrés-heure d'inconfort thermique estival ont été sélectionnées en tenant compte des considérations suivantes :

- Les variables qui ne sont pas significatives pour les besoins de chauffage et l'inconfort thermique estival ont été fixées selon leurs valeurs de référence. Il s'agit des variables N°8 (Lambda_T_eq), N°9 (Ep_isol_T_int), N°10 (Ep_isol_PB), N°11 (Lambda_isol_PB) et N°14 (Rho_isol).
- Bien qu'ayant une influence de 2% sur la variance des degrés-heure d'inconfort estival, la masse volumique du panneau CLT (variable N°15) est également fixée à sa valeur de référence. Il aura néanmoins été constaté dans cette étude que l'utilisation de bois feuillus peut contribuer à l'amélioration du confort thermique estival dans certaines configurations de bâtiment.
- L'épaisseur d'isolation intérieure du mur extérieur (variable N°4) n'influence que les besoins de chauffage à une hauteur de près de 3% de la variance totale. Cette variable vient donc en surplus de l'effet de la variable N°5 (Ep_isol_ME_ext) qui contribue à 18% de la variance totale. Dans le projet de référence, l'utilisation d'un isolant intérieur a

été adoptée pour assurer de bonnes performances acoustiques. N'ayant pas conservé d'objectif acoustique dans cette étude, l'épaisseur d'isolation intérieure de référence sera donc également fixée dans la suite de cette étude.

- Les variables relatives à l'épaisseur des revêtements intérieurs ont été fusionnées. Ainsi la variable N°7 (Ep_rev_ME) est remplacée par la variable N°12 (Ep_rev_C) qui varie de 0,013 à 0,05m et est nommé Ep_rev.

Finalement sept variables sont sélectionnées pour la modélisation de la fonction-objectif des besoins de chauffage et huit variables pour la modélisation de la fonction-objectif des degrés-heure d'inconfort thermique estival :

- pour les besoins de chauffage : N°16 (Sw_S), N°17 (Uw_S), N°5 (Ep_isol_ME_ext), N°3 (Lambda_ME_eq), N°20 (Prof_c), N°19 (Uw_O) et N°6 (Ep_CLT_ME) ;
- pour les degrés-heure d'inconfort estival : N°16 (Sw_S), N°1 (Ep_chape_P), N°20 (Prof_c), N°17 (Uw_S), N°18 (Sw_O), N°13 (Rho_rev), N°2 (Ep_CLT_PI), N°12 (Ep_rev).

Les variables significatives sélectionnées pour la modélisation de la fonction-objectif des besoins de chauffage, mais qui ne le sont pas pour la modélisation de la fonction-objectif des degrés-heure d'inconfort thermique estival seront fixées à leur valeur nominale pour la modélisation de la fonction-objectif des degrés-heure d'inconfort thermique estival. Inversement, les variables significatives sélectionnées pour la modélisation de la fonction-objectif des degrés-heure d'inconfort estival, mais qui ne le sont pas pour la modélisation de la fonction-objectif des besoins de chauffage seront fixées à leur valeur nominale pour la modélisation de la fonction-objectif des besoins de chauffage.

Le Tableau 13 liste les 23 variables significatives sélectionnées et leur domaine de variation pour l'optimisation du système constructif du cas d'étude. Les variables qualitatives nominales ont été formulées de manière à être interprétées comme des variables quantitatives discrètes.

Tableau 13 : Récapitulatif des variables significatives sélectionnées pour l'optimisation multiobjectif du système constructif du cas d'étude

VARIABLES	DESCRIPTION	UNITE	TYPE DE VARIABLE	DOMAINE DE VARIATION
Type_PI	Type de plancher intermédiaire	-	Discrète	Type_PI={CLT=0 ;Solives=1 ;Beton=2}
nb_plis_PI	Nombre de plis CLT	-	Discrète	nb_plis_PI = {3;5;7}
h_plis_T_PI	Épaisseur des plis CLT transversaux	m	Continue	0,02≤h_plis_T_PI≤0,06
h_plis_L_PI	Épaisseur des plis CLT longitudinaux	m	Continue	0,02≤h_plis_L_PI≤0,08
h_plis_L_Plb	Épaisseur des plis CLT extérieurs longitudinaux pour les panneaux 5 plis	m	Continue	0,02≤h_plis_L_Plb≤0,08
nb_rt	Nombre de renfort	-	Discrète	nb_rt = {1;3;5;7}
h_sol	Hauteur des solives	m	Continue	0,1≤h_sol≤0,4
b_sol	Épaisseur des solives	m	Continue	0,07≤b_sol≤0,21
e_sol	Entraxe des solives	m	Discrète	e_sol ∈ {0,3;1} avec discrétisation de 0,1
Ep_chape	Épaisseur de la chape béton	m	Continue	0,4≤ Ep_chape ≤0,1 ou Ep_chape=0
Type_ME	Type de mur extérieur	-	Discrète	Type_PI={CLT=0 ;Ossature=1}
h_plis_T_ME	Épaisseur des plis CLT transversaux	m	Continue	0,02≤h_plis_T_ME≤0,03
h_plis_L_ME	Épaisseur des plis CLT longitudinaux	m	Continue	0,02≤h_plis_L_ME≤0,03
L_montants	Largeur des montants	m	Continue	L_montants=Ep_isol_ME_ext
b_montants	Épaisseur des montants	m	Continue	0,07≤b_sol≤0,21
e_montants	Entraxe des montants	m	Discrète	e_sol {0,3 ;0,4 ;0,6}
Ep_isol_ME_ext	Épaisseur du complexe isolant extérieur	m	Continue	0,1≤Ep_isol_ME_ext≤0,24
Type_isol_ME_ext	Matériau de l'isolant extérieur	m	Discrète	Type_isol_ME_ext={Poly=0;FDV32=1;FDV35=2}
Ep_rev	Épaisseur du panneau de revêtement intérieur des plafonds, cloisons et murs extérieurs	m	Discrète	Ep_rev_P = {0,013;0,026;0,039}
Type_rev	Type de panneau de revêtement	m	Discrète	Type_PI={gypse=0;gypse cellulose=1}
Type_fen_S	Type de fenêtre Sud	-	Discrète	Type_fen_S ³⁰ = {DV=0 ;DVsol=1;TV=2}
Type_fen_O	Type de fenêtre Ouest et Nord	-	Discrète	Type_fen_O ²⁹ = {DV=1;DVso=1 ;TV=2}
Prof_c	Profondeur des protections solaires	m	Continue	1,5≤Prof_c≤2,5

³⁰ Trois types de fenêtre : triple vitrage (TV), double vitrage (DV) et double vitrage avec traitement solaire (DVsol)

III.5.c Graphe d'influence

La conception du système constructif nécessite de répondre simultanément à plusieurs objectifs de performance qui font intervenir des variables de décisions communes. Le graphe d'influence présenté en Figure 50 montre que les variables de décision sélectionnées influencent plusieurs objectifs de performance. Selon les variables de décisions, les objectifs de performances peuvent alors être contradictoires.

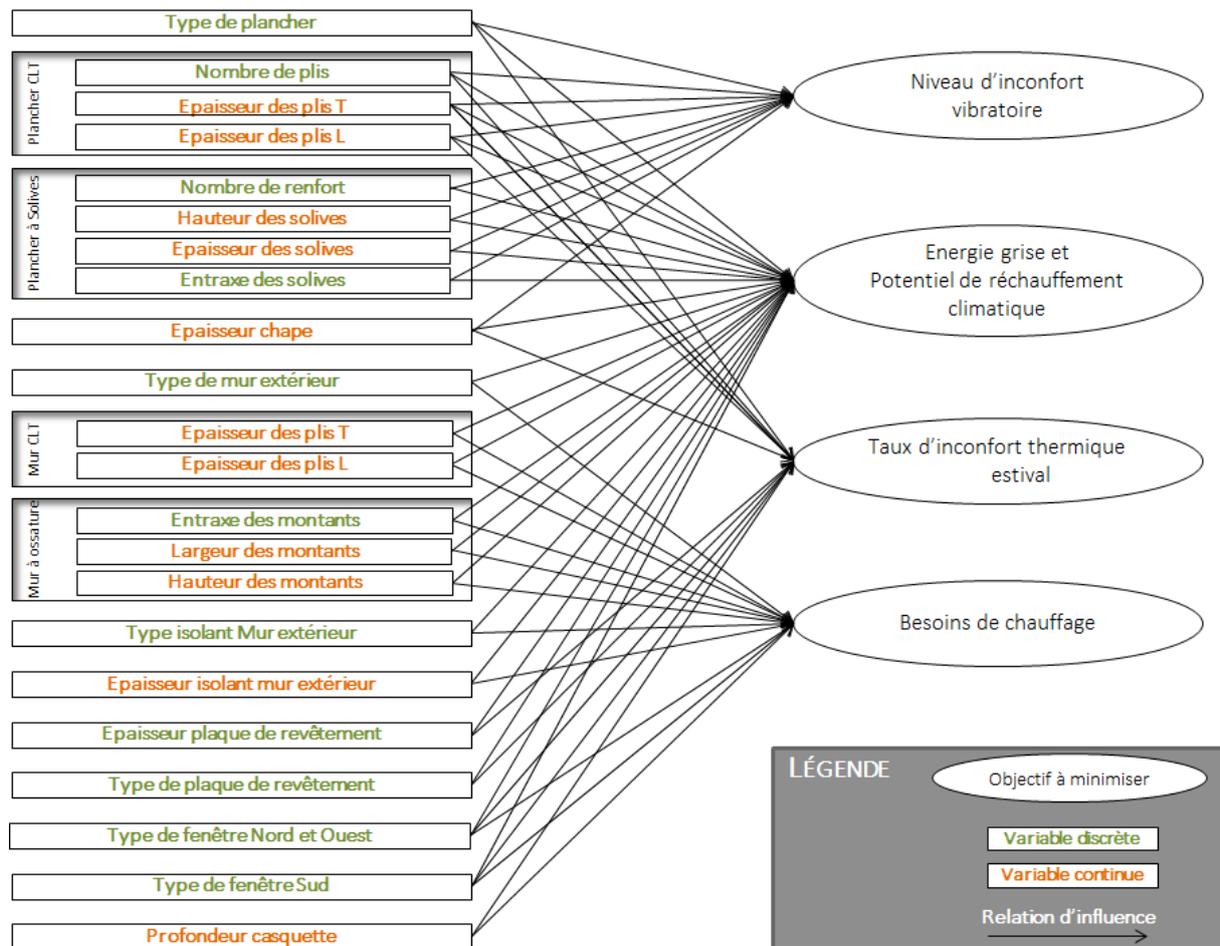


Figure 50 : Graphe d'influence représentant les liens entre variables et objectifs³¹

³¹ Dans ce graphe les objectifs de minimisation de l'énergie grise et du potentiel de réchauffement climatique ont été regroupés dans la même bulle car dépendent de variables communes.

Chapitre IV. Explicitation des liens entre variables et objectifs et modélisation des fonctions-objectif

Ce chapitre porte sur la modélisation des fonctions-objectif correspondant à chacun des objectifs précédemment choisis et relatifs à la maximisation du confort vibratoire des planchers intermédiaires et à la minimisation des besoins de chauffage, de l'inconfort thermique estival, du potentiel de réchauffement climatique et de l'énergie grise :

- La modélisation de la fonction-objectif relative au confort vibratoire des planchers passe par l'explicitation des liens entre variables et objectifs. Pour cela des modules simplifiés de calcul analytique basé sur l'*Eurocode 5* sont réalisés pour des planchers CLT et à solives pouvant éventuellement supporter une chape. À partir de ces modules, des fonctions analytiques simples sont déduites. La fonction-objectif relative au confort vibratoire des planchers intermédiaires est ensuite modélisée en distinguant plusieurs niveaux de confort vibratoire.
- La modélisation des fonctions-objectif en lien avec les besoins de chauffage et le confort thermique estival est réalisée à partir de métamodèles qui sont des fonctions analytiques simples pouvant se substituer aux modèles numériques détaillés. La construction de ces métamodèles nécessite plusieurs évaluations du modèle numérique de simulation thermique dynamique. Une démarche de construction est alors proposée puis appliquée sur le cas d'étude.
- La modélisation des fonctions-objectif correspondant au potentiel de réchauffement climatique et à l'énergie grise passe par des fonctions analytiques simples qui sont des sommes pondérées de l'impact environnemental des produits considérés par leur quantité.

Des contraintes relatives à la sécurité de l'ouvrage sont également choisies et modélisées sous forme de fonctions analytiques à partir de modules mécaniques explicités dans ce chapitre.

En conclusion, la méthodologie développée est illustrée par un logigramme spécifiquement adapté à l'optimisation de systèmes constructif bois pour les bâtiments multiétages.

IV.1. Fonction-objectif en lien avec le confort vibratoire des planchers

La modélisation du confort vibratoire d'un plancher a été faite par des modules simplifiés de calcul analytique (Garnesson 2014). Dans cette approche, seuls les planchers courants à solives et les planchers à panneaux de bois lamellés croisés reposant sur deux appuis ont été considérés. Ces planchers peuvent comporter une chape légère. Ce sont les planchers les plus fréquemment employés. Pour tenir compte d'autres configurations ou catégories de plancher, des modules supplémentaires doivent être développés.

L'*Eurocode 5* propose trois critères de vérification du confort vibratoire des planchers bois courants à respecter qui ont déjà été abordés dans le III.2.a et sont explicités dans l'Annexe C.

Quand il s'agit de planchers réalisés à partir de solives bois, la qualification du niveau de vibratoire (N_{vib}), s'appuie sur l'annexe nationale de l'*Eurocode 5* (AFNOR 2010a). D'après cette annexe, un confort normal est caractérisé par une valeur de la souplesse comprise entre 1 et 1,6 mm/kN. Il est également indiqué qu'un autre niveau de confort peut être atteint du moment que la valeur de la souplesse reste inférieure à 3 mm/kN.

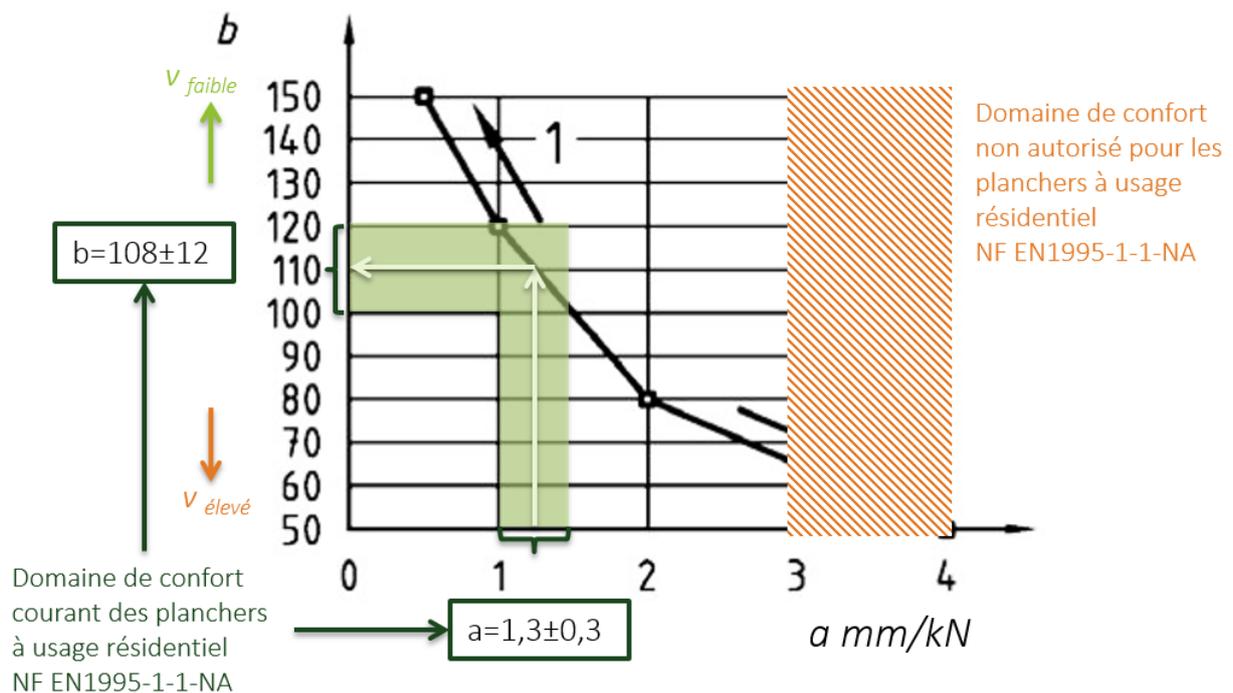


Figure 51 : Domaines de valeurs de la souplesse permettant de caractériser le confort vibratoire d'un plancher à solives. D'après Bocquet (2009)

La fréquence naturelle fondamentale du plancher doit dans tous les cas rester supérieure ou égale à 8 Hz afin de pouvoir employer les formules simplifiées de l'*Eurocode 5* et la vitesse impulsionnelle doit rester inférieure ou égale à une valeur limite. Partant de ces indications et pour être en adéquation avec cette norme quatre niveaux de confort (1, 2, 3 ou 4) ont alors été définis (voir Équation [IV.1]) afin de qualifier le confort vibratoire des solutions de plancher.

Un cinquième niveau (0) permettant de qualifier les planchers présentant une performance accrue vis-à-vis du confort vibratoire a été ajouté.

[IV.1]

$N_{vib} = 0$: Excellent pour $a \leq 0,5 \text{ mm/kN}$ et $f_{Hz} \geq 8\text{Hz}$ et $v_{lim} \leq v_{max}$
$N_{vib} = 1$: Très bon pour $0,5 < a < 1 \text{ mm/kN}$ et $f_{Hz} \geq 8\text{Hz}$ et $v_{lim} \leq v_{max}$
$N_{vib} = 2$: Bon pour $1 \leq a \leq 1,6 \text{ mm/kN}$ et $f_{Hz} \geq 8\text{Hz}$ et $v_{lim} \leq v_{max}$
$N_{vib} = 3$: Moyen pour $1,6 < a < 3 \text{ mm/kN}$ et $f_{Hz} \geq 8\text{Hz}$ et $v_{lim} \leq v_{max}$
$N_{vib} = 4$: Inacceptable pour $a \geq 3 \text{ mm/kN}$ ou $f_{Hz} < 8\text{Hz}$ ou $v_{lim} > v_{max}$

où :

- N_{vib} est le niveau de confort ;
- a est la souplesse du plancher ;
- f_{Hz} est la fréquence naturelle fondamentale ;
- v_{max} est le seuil de la vitesse impulsionnelle maximale ;
- v_{lim} est la vitesse impulsionnelle limite.

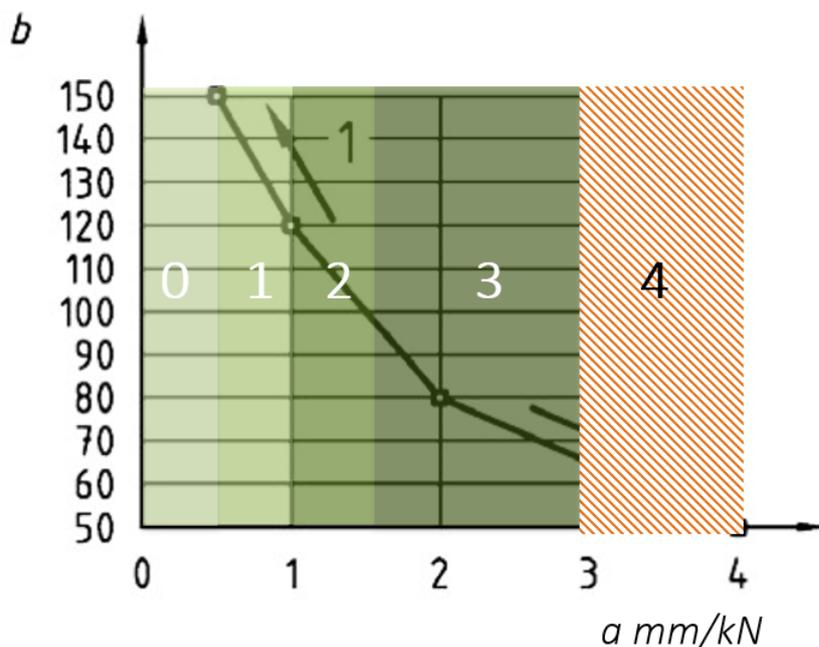


Figure 52 : Niveaux de confort vibratoire déterminés selon la souplesse du plancher

Concernant les planchers réalisés à partir de panneaux CLT la qualification du confort vibratoire nécessite dans un premier temps la vérification du critère défini dans l'équation [III.9] et fonction de la fréquence naturelle fondamentale du plancher et de sa souplesse dont les calculs sont explicités dans l'Annexe C selon les équations [C. 9] et [C. 10] page 230.

Ce critère de vérification n'est accompagné d'aucune autre indication permettant de qualifier le confort vibratoire. Si seules ces recommandations sont considérées, deux niveaux de confort,

acceptable et inacceptable, peuvent être définis. Afin d'être en mesure de comparer des planchers CLT et à solives cinq niveaux de confort basés sur des critères semblables ont été définis. C'est donc sur la valeur de la souplesse et sur le critère de vérification défini par FPIInnovation que se base la qualification du confort vibratoire des planchers CLT (Équation [IV.2]).

$N_{vib} = 0 : \text{Excellent pour } a \leq 0,5 \text{ mm/kN et } \frac{f_{Hz}}{a^{0,7}} \geq 13$ $N_{vib} = 1 : \text{Très bon pour } 0,5 < a < 1 \text{ mm/kN et } \frac{f_{Hz}}{a^{0,7}} \geq 13$ $N_{vib} = 2 : \text{Bon pour } 1 \leq a \leq 1,6 \text{ mm/kN et } \frac{f_{Hz}}{a^{0,7}} \geq 13$ $N_{vib} = 3 : \text{Moyen pour } 1,6 < a < 3 \text{ mm/kN et } \frac{f_{Hz}}{a^{0,7}} \geq 13$ $N_{vib} = 4 : \text{Inacceptable pour } a \geq 3 \text{ mm/kN ou } \frac{f_{Hz}}{a^{0,7}} < 13$ <p>où :</p> <ul style="list-style-type: none"> - N_{vib} est le niveau de confort vibratoire du plancher ; - a est la souplesse du plancher ; - f_{Hz} est la fréquence naturelle fondamentale. 	[IV.2]
--	--------

De cette manière, il est possible de comparer un plancher CLT à un plancher à solives vis-à-vis du confort vibratoire. La comparaison est alors basée sur la réponse en déplacement vertical du plancher à une charge statique de 1 kN agissant à l'endroit le plus défavorable. La fonction-objectif retourne la valeur (0), (1), (2), (3) ou (4) en considérant les paramètres de conception ayant une influence sur la fréquence naturelle fondamentale du plancher et sur la flèche statique à mi-portée sous une charge de 1kN du panneau CLT de 1m de largeur.

La fonction-objectif *confort vibratoire du plancher* ($F_{vibration}$) [7] va permettre de minimiser le niveau de confort.

$F_{vibration} : \min(N_{vib}(\vec{X}))$	[IV.3]
--	--------

IV.2. Fonctions-objectif en lien avec le confort thermique estival et les besoins de chauffage

La fonction-objectif *besoin de chauffage* (F_{Bch}) consiste à minimiser les besoins de chauffage annuel surfacique du bâtiment étudié pour maintenir une consigne de température minimale fixée (cf. Équation [III.10] page 114).

La fonction-objectif *inconfort thermique* (F_{DH}) consiste à minimiser la somme des degrés-heures (DH) supérieurs à 26°C du logement situé au niveau supérieur (R+4) du bâtiment sur la période estivale.

IV.2.a Utilisation de métamodèles pour la modélisation des fonctions-objectif

L'utilisation de modèles détaillés nécessite quelques secondes à plusieurs minutes pour estimer les performances thermiques (besoins de chauffage et températures) d'un bâtiment. Lorsque l'approche de conception traditionnelle est employée, seules quelques solutions sont évaluées. Les temps de calcul requis par un modèle détaillé sont donc acceptables. Dans le cas d'une optimisation multiobjectif un grand nombre de simulations peut être nécessaire.

L'utilisation d'un algorithme d'optimisation multiobjectif constitué d'une métaheuristique à population vise par exemple une optimisation efficace, c'est-à-dire qui permet d'obtenir de nombreuses solutions sur le front de Pareto avec un nombre d'évaluations réduit. Dans le cas optimiste d'un temps de simulation de 15 secondes par itération avec une population de 200 individus et une recherche composée de 50 itérations, 10 000 solutions devront être évaluées. Cela correspond à un temps de calcul de plus de 40 heures sans considérer les temps de traitement intermédiaires. Il est à noter que ce processus nécessite souvent d'être réitéré pour régler les paramètres d'optimisation ou tester de nouvelles plages de variation.

Pour limiter le temps de calcul, différentes alternatives peuvent être adoptées en :

- utilisant un modèle simplifié ;
- réduisant la taille de la population ou le nombre d'itérations de l'algorithme d'optimisation ;
- distribuant les calculs sur un nombre de machines plus important ;
- utilisant un modèle de substitution.

La première solution n'est pas adaptée pour modéliser des systèmes et des phénomènes physiques complexes. La seconde peut réduire de façon significative la performance des algorithmes d'optimisation et peut conduire à des solutions médiocres. La solution consistant à distribuer les calculs sur plusieurs machines nécessite soit un investissement important en matériel informatique ou bien la location d'une ferme informatique. Si le nombre d'individus augmente, il faudra accroître le nombre de machines. Enfin, l'option la plus prometteuse est l'utilisation d'un modèle de substitution. Il s'agit d'une approximation du modèle de simulation d'origine. Les sorties sont alors exprimées analytiquement en fonction des variables de décision. Cette dernière approche s'est avérée efficace dans de nombreux travaux sur l'optimisation de bâtiments (Magnier and Haghghat 2010; Eisenhower et al. 2012; Gossard et al. 2013). Les métamodèles sont faciles à mettre en œuvre dans le processus d'optimisation et peuvent être utilisés en appui à la réalisation d'analyse de sensibilité sur les variables de décision (Eisenhower et al. 2012). Ils permettent donc d'évaluer la fonction-objectif en évitant l'exécution de simulations détaillées à chaque itération.

Dans ces travaux, les fonctions-objectif *besoin de chauffage* (F_{Bch}) et *inconfort thermique* (F_{DH}) consisteront donc à minimiser des fonctions analytiques correspondant aux métamodèles obtenus en sortie du modèle de bâtiment simulé sous EnergyPlus, respectivement Bch et DH . L'élaboration et le détail de ces métamodèles font l'objet des sections suivantes.

$$F_{Bch} : \min(\mathcal{M}_{Bch}(\vec{X}))$$

[IV.4]

$$F_{DH} : \min(\mathcal{M}_{DH}(\vec{X})) \quad [IV.5]$$

IV.2.b Critères de choix du métamodèle

Les métamodèles sont des fonctions mathématiques qui permettent d'approximer et de prédire les réponses du modèle étudié en bénéficiant à la fois de la rapidité de calcul des modèles simplifiés et d'une précision proche de celle obtenue avec des modèles détaillés. Dans la littérature, l'emploi de métamodèles en substitution de modèles de simulation thermique dynamique de bâtiments s'est intensifié au cours de ces dix dernières années (Zhao and Magoulès 2012; Fouquier et al. 2013; Van Gelder et al. 2014).

Soit un modèle détaillé de simulation thermique dynamique, f , ayant n variables de décisions réunies dans un vecteur d'entrée $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, et une grandeur d'intérêt Y correspondant au résultat d'évaluation du modèle f selon l'équation [IV.6], pour chaque grandeur d'intérêt Y , un métamodèle \mathcal{M} permet d'obtenir une approximation \tilde{Y} telle que l'équation [IV.7].

$$Y = f(\vec{X}) \quad [IV.6]$$

$$\tilde{Y} = \mathcal{M}(\vec{X}) \quad [IV.7]$$

$$\text{avec } Y \approx \tilde{Y}$$

L'établissement d'un métamodèle nécessite de passer par deux étapes successives (Nguyen et al. 2014) :

1. Génération d'un échantillon de vecteurs d'entrée \vec{X} et calcul des grandeurs d'intérêt Y correspondantes. Cet échantillon constitue la base de données nécessaire à la construction du métamodèle et à sa validation.
2. Construction du métamodèle \mathcal{M} à partir d'une partie de l'échantillon générée à l'étape 1 avec une méthode appropriée (ex. : Krigeage, Réseaux de neurone artificiel, machines à vecteur de support, décomposition par polynômes du chaos).
3. Validation du métamodèle obtenu à partir du reste de l'échantillon non utilisé pour la construction du métamodèle.

Plusieurs méthodes de construction de métamodèles ont déjà été appliquées à la modélisation thermique des bâtiments.

Chlela et al. (2009) utilisent une approche par plans d'expériences pour déterminer les coefficients de polynômes quadratiques pour l'évaluation des performances énergétiques des bâtiments. Le couplage de plusieurs plans d'expérience permet d'augmenter significativement la précision des métamodèles et nécessite moins de 400 simulations pour 13 variables, chacune pouvant prendre 5 valeurs discrètes. L'erreur relative maximum obtenue avec le meilleur couplage dépend du climat considéré et est de 2,02 kWh/(m².an) pour les besoins de rafraîchissement et de 0,85 kWh/(m².an) pour les besoins de chauffage.

Afin de modéliser deux fonctions-objectif représentatives de la consommation énergétique et de l'inconfort thermique d'un bâtiment résidentiel, Magnier et Haghghat (2010) ont généré

cinq métamodèles à partir d'un échantillon de 450 simulations réalisées sous TRNSYS et de 12 variables de décisions. Grâce à l'utilisation des métamodèles, les fonctions-objectif ont été modélisées par des fonctions analytiques rapides à calculer. Le bâtiment a ensuite été optimisé en minimisant simultanément la consommation énergétique et l'inconfort thermique à partir d'un algorithme génétique. La génération de l'échantillon a nécessité trois semaines. Si l'algorithme génétique avait été directement couplé avec le modèle numérique TRNSYS, Magnier et Haghghat (2010) estiment qu'une dizaine d'années auraient été nécessaires pour finaliser le processus d'optimisation.

Eisenhower et al. (2012) ont utilisé la méthode des SVM (*Support Vector Machine*) pour générer plusieurs métamodèles correspondant à un modèle de bâtiment EnergyPlus constitué de 30 zones thermiques et en considérant plus de 1000 variables de décision. L'échantillon utilisé pour le calcul des métamodèles était composé de 5000 solutions dont la simulation a été parallélisée sur une ferme de calcul constituée de 184 cœurs Linux.

Tresidder et al. (2012) ont utilisé des métamodèles obtenus par krigeage pour optimiser les émissions de CO₂ et les coûts de construction d'un bâtiment avec des algorithmes évolutionnaires. Un échantillon de 200 simulations a préalablement été calculé sous EnergyPlus avec 10 variables de décisions. Le bâtiment a ensuite été optimisé à plusieurs reprises soit en utilisant les métamodèles soit en couplant directement l'algorithme d'optimisation à EnergyPlus. Les résultats ont alors été comparés et montrent que dans le cas où un seul objectif est optimisé l'utilisation du métamodèle permet de réduire significativement le nombre de solutions à calculer pour faire converger l'optimisation. Dans le cas d'une optimisation multiobjectif, l'utilisation des métamodèles n'est pas aussi avantageuse en temps de calcul en raison du temps nécessaire à leur génération. Les auteurs concluent que d'autres travaux doivent être réalisés pour réduire la taille de l'échantillon nécessaire à la réalisation des métamodèles.

Plus récemment, Merheb (2013) et Rabouille (2014) ont généré des métamodèles à partir d'une décomposition par polynômes du chaos. Afin d'analyser la propagation d'incertitude sur les consommations de chauffage et l'inconfort thermique estival estimés sous EnergyPlus, Merheb (2013) a réalisé des métamodèles à partir de 16 paramètres incertains. Tandis que le modèle principal nécessite 200 secondes pour évaluer les besoins de chauffage, l'utilisation d'un métamodèle permet d'évaluer 2056 solutions en une seconde. Un échantillon de 2000 simulations a été nécessaire pour calculer un polynôme quadratique correspondant aux besoins de chauffage. L'erreur relative maximum obtenue était alors de 0,22 kWh/(m².an). Rabouille a utilisé cette même technique de génération de métamodèle pour étudier la réhabilitation de bâtiments en considérant huit variables de conception.

Il n'y a pas de consensus sur la meilleure méthode de génération de métamodèle. L'efficacité d'une méthode par rapport à une autre dépend de la linéarité des grandeurs d'intérêt, du nombre de variables de décisions considéré et de la stabilité du modèle initial (Jin et al. 2001). Dans une étude comparative portant sur cinq techniques de construction de métamodèle appliquées à la simulation énergétique d'un bâtiment, Van Gelder et al. (2014) montrent que certaines méthodes sont plus performantes sur un cas d'étude considéré, mais que l'ensemble des méthodes peut être approprié en augmentant par exemple la taille de l'échantillon de construction. Néanmoins lorsque le temps de calcul nécessaire à l'évaluation d'une solution est

important avec le modèle initial, il devient crucial de limiter la taille de l'échantillon de construction. Or, comme le soulignent Nguyen et al. (2014), l'utilisation d'un métamodèle à la place du modèle détaillé augmente l'incertitude et le risque d'accumulation d'erreurs au cours du processus d'optimisation. L'enjeu est alors de trouver le meilleur compromis entre la taille de l'échantillon de construction et la précision du métamodèle. Ce compromis peut être obtenu en diminuant le nombre de variables de décision et/ou leur plage de variation, en modifiant les paramètres intrinsèques à la technique de construction de métamodèle utilisée (ex. : en diminuant le degré du polynôme), en diminuant la taille de l'échantillon ou le cas échéant, en changeant de technique de construction de métamodèle.

Dans ces travaux, le modèle initial est celui du logiciel de simulation thermique dynamique EnergyPlus, utilisé en tant que boîte noire. La technique de construction de métamodèle choisie doit être sans *a priori* sur la forme des grandeurs d'intérêt qui peuvent être non-linéaires et discontinues. C'est le cas de la technique de construction de métamodèle par décomposition par polynômes du chaos. Elle est uniquement basée sur la connaissance d'un échantillon (fini) de couples entrées-sorties du modèle initial f et peut donc être qualifiée de méthode non intrusive. De plus, Sudret (2008) et Crestaux et al. (2009) ont montré que les indices de Sobol du premier ordre et d'ordre total se déduisent directement depuis les coefficients de métamodèles obtenus par décomposition en polynômes de chaos. L'avantage qui en découle est la possibilité de réduire le nombre de variables de décision lorsque la taille de l'échantillon de construction devient trop importante pour atteindre la précision souhaitée. Enfin, cette méthode dans sa forme généralisée permet de tenir compte de variables continues et discrètes (D.Xiu et al. 2002). Cette méthode a donc été choisie pour modéliser analytiquement les besoins de chauffage et l'inconfort thermique estival nécessaires à la modélisation des fonctions-objectif de thermiques.

IV.2.c Les métamodèles par polynômes du chaos (PC)

Décomposition en polynôme du chaos et détermination des coefficients

Le chaos polynomial (PC) est une méthode de construction de métamodèle par approximation polynomiale d'une variable aléatoire dans un espace de probabilité. Introduit dans les années 30 par Wiener (1938), le chaos homogène consiste à approcher une grandeur d'intérêt aléatoire provenant d'un espace probabilisé par projection dans une base orthonormale de polynômes à variables multiples dépendant de chaque variable d'entrée aléatoire. Dans la version originale de Wiener, la base considérée est une base de polynômes d'Hermite d'une variable aléatoire gaussienne centrée réduite. Cette version a ensuite été généralisée par Xiu et Karniadakis (2002) avec la prise en compte de variables à distribution non gaussienne et d'autres bases de polynômes orthogonaux correspondantes, il s'agit du chaos polynomial généralisé. Quelques distributions de variables et les familles de polynômes orthogonaux associées sont présentées dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Distribution de probabilité des variables et famille de polynômes orthogonaux associée (D.Xiu et al. 2002)

Type	Distribution de probabilité	Base polynomiale	Support
Continue	Gaussienne	Hermite	$(-\infty, +\infty)$
	Gamma	Laguerre	$[0, +\infty)$
	Beta	Jacobienne	$[a, b]$
	Uniforme	Legendre	$[a, b]$
Discret	Poisson	Charlier	$\{0, 1, 2, \dots, N\}$
	Binomiale	Krawtchouk	$\{0, 1, 2, \dots, N\}$

Il s'agit alors de modéliser une grandeur d'intérêt Y provenant du modèle numérique f (équation [IV.6]) par un développement en série selon l'équation [IV.8]. Un vecteur de composantes indépendantes \vec{Z} construit selon une collection de distribution μ_z est alors introduit tel que la dimension de \vec{Z} soit égale à la dimension du vecteur d'entrée \vec{X} et que Γ soit une transformation isoprobabiliste entre \vec{X} et \vec{Z} telle que $\vec{Z} = \Gamma(\vec{X})$. Une loi de distribution μ_{z_i} est ainsi attribuée à chaque composante indépendante du vecteur d'entrée \vec{Z} . Pour chaque variable d'entrée z_i , une base spécifique est alors choisie selon la distribution de probabilité de la variable (Tableau 14). L'objectif est de représenter Y à l'aide de \vec{Z} et d'une série de polynômes orthonormés formant une famille complète $(\psi_k)_{k \in \mathbb{N}}$ par rapport à μ_z puis d'estimer les coefficients du développement α_i correspondant aux coordonnées de la réponse du modèle dans la base polynomiale qui a été définie.

$$Y = g(\vec{Z}) = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i \psi_i(\vec{Z}) \quad [IV.8]$$

où :

- $\vec{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ est un vecteur de composantes indépendantes ;
- α_i sont les coefficients du développement ;
- $\psi_i(\vec{Z})$ sont les vecteurs de la base de polynômes à variables multiples.

La famille complète $(\psi_i)_{i \in \mathbb{N}}$ est obtenue par tensorisation de n polynômes $(\phi_{k_j^{(j)}}^{(j)})_{k_j \in \mathbb{N}}$ de la base correspondante à la $j^{\text{ème}}$ variable selon l'équation [IV.9]. La famille $(\psi_i)_{i \in \mathbb{N}}$ est alors polynômiale, c'est la base du chaos polynômial.

$$\psi_i(\vec{Z}) = \prod_{j=1}^n \phi_{k_j^{(j)}}^{(j)}(z_j) \quad [IV.9]$$

où :

- $\phi_{k_j^{(j)}}^{(j)}$ est le polynôme orthogonal associé à la $j^{\text{ème}}$ variable de degré k_j ;
- $k_j^{(j)} = (k_1, k_2, \dots, k_n)^{(j)}$ est le multi-indice composé des degrés $k_j \in \mathbb{N}$;
- Le degré de la famille ψ_i est alors égale à $|k|^{(i)} = \left(\sum_{j=1}^n k_j \right)^{(i)}$

L'orthogonalité des polynômes $\phi_{k_j}^{(j)}$ et l'indépendance des variables z_i impliquent que la famille complète $(\psi_k)_{k \in \mathbb{N}}$ constitue une base orthogonale. Le produit scalaire (représenté par $\langle \cdot, \cdot \rangle$) de deux fonctions polynomiales différentes est alors nul.

$$\langle \psi_i(\vec{Z}), \psi_j(\vec{Z}) \rangle = \delta_{ij} \text{ avec } \delta_{ij} = 0 \text{ si } i \neq j \text{ sinon } \delta_{ij} = 1 \quad [\text{IV.10}]$$

Pour des raisons de calculs numériques, la série de polynômes est tronquée à l'ordre p de façon à ne conserver que les polynômes ψ_i de la base dont le degré total est inférieur ou égal à p . La nouvelle série tronquée s'écrit alors selon l'équation [IV.11] où P est le nombre d'éléments de la suite et donc de coefficients α_i à calculer. P dépend du nombre de variables d'entrée n et du degré maximum des polynômes p et est déterminé selon l'équation [IV.12].

$$\tilde{Y} = h(\vec{Z}) = \sum_{i=0}^{P-1} \tilde{\alpha}_i \psi_i(\vec{Z}) \quad [\text{IV.11}]$$

où ψ_i est exprimée selon l'équation [IV.9] 140

$$\text{avec } \sum_{j=1}^n k_j^{(i)} \leq p \quad \forall k_j \in \{0, 1, \dots, p-1\}$$

$$P = \binom{n+p}{p} = \frac{(n+p)!}{n!p!} \quad [\text{IV.12}]$$

A partir de la transformation isoprobabiliste Γ entre \vec{X} et \vec{Z} , l'équation [IV.11] peut alors s'écrire selon l'équation [IV.13] et permet de retrouver l'expression du métamodèle \mathcal{M} de l'équation [IV.7].

$$\tilde{Y} = \mathcal{M}(\vec{X}) = \sum_{i=0}^{P-1} \tilde{\alpha}_i \psi_i \circ \Gamma(\vec{X}) \quad [\text{IV.13}]$$

L'étape suivante est alors de déterminer les coefficients α_i pour obtenir l'expression complète du métamodèle. Trois méthodes de calcul des coefficients sont présentées par Crestaux et al. (2009) : La projection de Galerkin, la minimisation par moindres carrés et la projection spectrale non intrusive.

La méthode de projection de Galerkin est une méthode intrusive qui nécessite des modifications dans le modèle numérique ; elle n'est donc pas adaptée pour ces travaux où le logiciel EnergyPlus fonctionne comme une boîte noire. Les deux autres approches non intrusives restent envisageables.

La méthode par projection spectrale non intrusive exploite l'orthogonalité du polynôme du chaos. Une projection sur chacun des polynômes de la base est alors réalisée pour obtenir les coefficients. Il s'agit alors d'évaluer l'ensemble des produits scalaires de la sortie avec les différents polynômes de la base selon l'équation [IV.14]. Le produit scalaire nécessite la résolution d'une intégrale dépourvue de forme analytique et qui doit être évaluée par une méthode de quadrature. Bien que performantes, ces méthodes nécessitent un coût de calcul important (Rabouille 2014).

$$\tilde{\alpha}_i = \left\langle h(\vec{Z}), \psi_i(\vec{Z}) \right\rangle \quad [IV.14]$$

La méthode d'approximation par moindres carrés consiste à rechercher les coefficients par régression en minimisant l'erreur quadratique entre le modèle polynomial et le modèle étudié selon l'équation [IV.15].

$$\tilde{A} = \underset{\tilde{\alpha}_i}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=1}^N \left(g(\vec{Z}^{(j)}) - \sum_{i=0}^{P-1} \tilde{\alpha}_i \psi_i(\vec{Z}^{(j)}) \right)^2 \quad [IV.15]$$

où :

- $\tilde{A} = \{\tilde{\alpha}_0, \dots, \tilde{\alpha}_{P-1}\}^T$ est l'ensemble des coefficients approchés à déterminer ;
- N est la taille de l'échantillon de construction avec $N > P$.

Le nombre de coefficients P à calculer est déterminé avec l'équation [IV.12]. Selon le nombre de variables n , plus le degré du polynôme à calculer sera important plus le nombre de coefficients augmentera. Par exemple, pour 30 variables de conception un polynôme nécessite le calcul de 31 coefficients pour un degré 1, de 496 coefficients pour un degré 2 et de 5456 coefficients pour un degré 3. Partant du principe que la taille de l'échantillon N doit être au minimum égal au nombre de coefficient P il apparaît clairement qu'elle dépend aussi largement du degré du polynôme p . La construction du métamodèle requiert alors la détermination d'une taille d'échantillon N et d'un degré de polynôme p adaptés au respect de contraintes de temps et de précision.

Plusieurs paramètres doivent ainsi être réglés dans la construction d'un métamodèle selon la technique du chaos polynomial. Par exemple un polynôme d'ordre trop faible ne permettra pas de représenter précisément la grandeur d'intérêt qui doit être modélisée. A l'inverse, un polynôme de degrés trop élevé va nécessiter l'approximation d'un nombre de coefficients P très important qui va induire une taille d'échantillon N également importante sans quoi la qualité de la réponse sera réduite. Lorsque le modèle est complexe et que l'ordre du polynôme à atteindre est élevé, une alternative consiste à revoir la sélection des variables de décisions. La complexité du modèle peut ainsi être réduite en éliminant des variables d'entrée.

Déduction des indices de Sobol

De même que la fonction f peut être décomposée en élément f_i selon [III.19] la fonction g exprimée par l'expression [IV.8] peut être décomposée selon l'équation [IV.16].

$$g(z_1, \dots, z_n) = g_0 + \sum_{i=1}^n g_i(z_i) + \sum_{i < j}^n g_{ij}(z_i, z_j) + \dots + g_{12\dots n}(z_1, \dots, z_n) \quad [IV.16]$$

Selon l'équation [IV.11], les éléments g_i de la décomposition de g sont approchés par les éléments h_i de la décomposition de h (équation [IV.17]).

$$g_i \approx h_i \quad \forall i \quad [IV.17]$$

L'expression des éléments de la décomposition en chaos polynomial de h tronquée à l'ordre p s'exprime selon l'équation [IV.18].

$$\begin{aligned}
 h_0 &= \tilde{\alpha}_0 \\
 h_j(z_j) &= \sum_{i \in k_j} \tilde{\alpha}_i \psi_i(z_j) \\
 h_{jk}(z_j, z_k) &= \sum_{i \in k_{jk}} \tilde{\alpha}_i \psi_i(z_j, z_k) \\
 &\dots \\
 h_{j\dots n}(z_j, \dots, z_n) &= \sum_{i \in k_{j\dots n}} \tilde{\alpha}_i \psi_i(z_j, \dots, z_n)
 \end{aligned}
 \tag{IV.18}$$

où :

- k_j est le multi-indice faisant intervenir uniquement la variable j ;
- k_{jk} est le multi-indice faisant intervenir uniquement les interactions entre les variables j et k ;
- $k_{j\dots n}$ est le multi-indice faisant intervenir uniquement les interactions entre les n variables.

La fonction h peut alors être décomposée selon l'équation [IV.19].

$$h(z_1, \dots, z_n) = \tilde{\alpha}_0 + \sum_{j=1}^n \sum_{i \in k_j} \tilde{\alpha}_i \psi_i(z_j) + \sum_{j < k} \sum_{i \in k_{j,k}} \tilde{\alpha}_i \psi_i(z_j, z_k) + \dots + \sum_{i \in k_{1,2,\dots,n}} \tilde{\alpha}_i \psi_i(z_1, \dots, z_n)
 \tag{IV.19}$$

Grace à l'orthogonalité de la base des polynômes du chaos et à la décomposition de h [IV.19] les expressions approchées de la variance totale et de la variance partielle de g s'écrivent selon l'équation [IV.20] (Crestaux et al. 2009).

$$V(Y) \approx \sum_{i=0}^{P-1} \tilde{\alpha}_i^2 \langle \psi_i, \psi_i \rangle \quad \text{et} \quad V_j(Y) \approx \sum_{i \in K_j} \tilde{\alpha}_i^2 \langle \psi_i, \psi_i \rangle \quad \text{avec} \quad \langle \psi_i, \psi_i \rangle = 1
 \tag{IV.20}$$

Une approximation des indices de Sobol du modèle initial f est donc obtenue par les indices de Sobol du modèle approché h qui s'expriment en fonction des coefficients $\tilde{\alpha}_i$ du métamodèle.

$$S_j \approx \frac{\sum_{i \in K_j} \tilde{\alpha}_i^2}{\sum_{i=0}^{P-1} \tilde{\alpha}_i^2}
 \tag{IV.21}$$

Exemple d'un métamodèle de degré 1 pour les besoins de chauffage

À titre d'exemple, un métamodèle de degré 1 a été construit pour modéliser les besoins de chauffage en tenant compte des sept variables significatives identifiées dans la section III.5.b. Le polynôme des besoins de chauffage est donc décrit dans l'équation [IV.15]. Les termes orange constituent les coefficients $\tilde{\alpha}_i$ du métamodèle.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{M}_{\text{Bch}}(\vec{Z}) &= 16,0441 + 1,02424 \times (1,73205 \times z_0) - 1,15611 \times (1,73205 \times \\
 & z_1) \\
 & - 0,333622 \times (1,73205 \times z_2) - 1,92443 \times (1,73205 \times z_3) \\
 & + 1,76598 \times (1,73205 \times z_4) + 0,481841 \times (1,73205 \times z_5) \\
 & + 0,690188 \times (1,73205 \times z_6)
 \end{aligned}
 \tag{IV.22}$$

La transformation isoprobabiliste entre \vec{X} et \vec{Z} permet d'obtenir le métamodèle en fonction des variables de décisions, $\mathcal{M}_{Bch}(\vec{X})$ (équation [IV.15]).

$$\begin{aligned} z_0 &= 80 \times (x_0 - 0,0425) \\ z_1 &= 14,29 \times (x_1 - 0,17) \\ z_2 &= 20 \times (x_2 - 0,07) \\ z_3 &= 6,66 \times (x_3 - 0,4) \\ z_4 &= 2 \times (x_4 - 1,3) \\ z_5 &= 2 \times (x_5 - 1,3) \\ z_6 &= 1,33 \times (x_6 - 1,75) \end{aligned} \tag{IV.23}$$

où les variables $x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ correspondent respectivement aux variables significatives N°3 (Lambda_ME_eq), N°5 (Ep_isol_ME_ext), N°6 (Ep_CLT_ME), N°16 (Sw_S), N°17 (Uw_S), N°19 (Uw_O) et N°20 (Prof_c)

IV.2.d Démarche adoptée pour la génération des métamodèles

La génération des métamodèles est constituée de cinq étapes successives récapitulées dans la Figure 52 et explicitées en suivant.

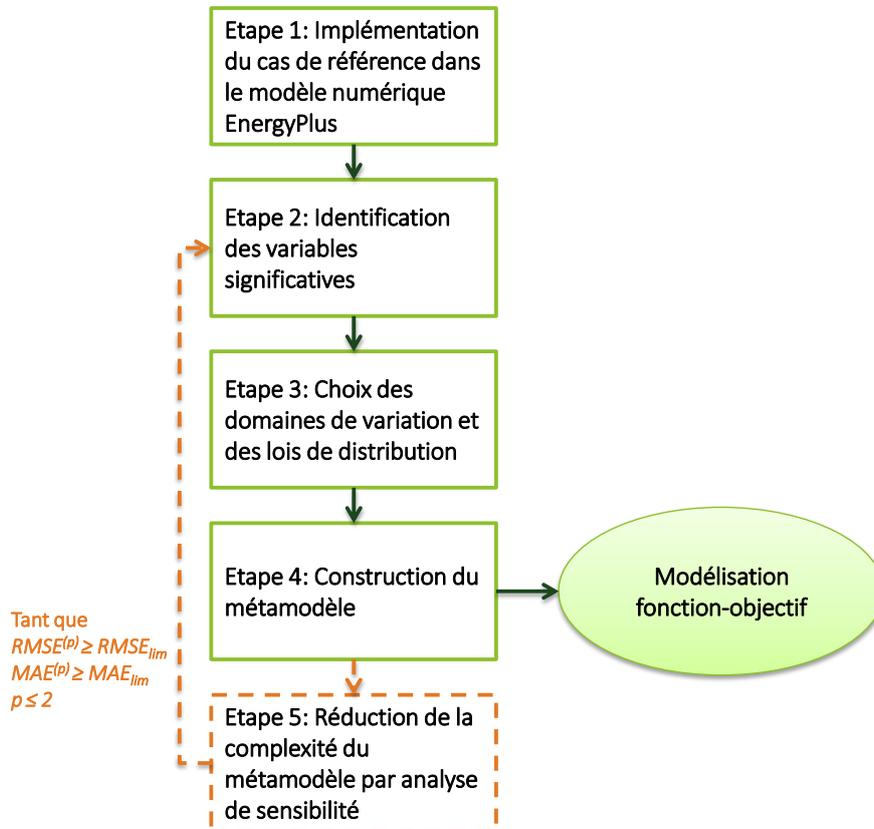


Figure 53 : Étapes de la démarche adoptée pour la génération des métamodèles

Étape 1 : Saisie du cas d'étude dans le modèle numérique EnergyPlus

Le bâtiment étudié est saisi dans le logiciel EnergyPlus. Cette saisie a recours à la plateforme logicielle de simulation thermique dynamique présentée dans la Figure 42 page 113. Les données d'entrée sont alors générées selon un fichier de format « idf » dont un échantillon est donné en Figure 54.

Étape 2 : Identification des variables significatives

L'étape suivante est une étape commune à la démarche d'optimisation multiobjectif présentée Figure 22 page 74. Il s'agit de l'identification de n variables significatives influençant les objectifs de thermique à optimiser. Ces variables peuvent alors être identifiées et sélectionnées par la théorie, l'analyse de sensibilité et l'expertise. Le fichier « idf » correspondant au cas d'étude est alors modifié en remplaçant les valeurs numériques du cas de référence par des chaînes de caractère spécifiques à chaque variable. Par exemple, dans la Figure 54 l'épaisseur de revêtement de la cloison Ep_rev et sa masse volumique Rho_rev viennent remplacer les valeurs numériques correspondantes.

```
!-Generator IDFEditor 1.44
!-Option SortedOrder

!-NOTE: All comments with '!-' are ignored by the IDFEditor and are generated automatically.
!-      Use '!' comments if they need to be retained when using the IDFEditor.

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL =====

Material,
  CI_Revetement,      !- Name
  Smooth,            !- Roughness
  Ep_rev,            !- Thickness {m}
  0.35,              !- Conductivity {W/m-K}
  Rho_rev,           !- Density {kg/m3}
  950,               !- Specific Heat {J/kg-K}
  0.91,              !- Thermal Absorptance
  0.2,               !- Solar Absorptance
  0.2;               !- Visible Absorptance

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: CONSTRUCTION =====

Construction,
  Cloisons,          !- Name
  CI_Revetement,     !- Outside Layer
  CI_LDR,            !- Layer 2
  CI_Revetement;     !- Layer 3
```

Figure 54 : Echantillon d'un fichier « .idf » correspondant au cas d'étude dans lequel les valeurs numériques de deux variables ont été remplacées par des chaînes de caractères

Étape 3 : Choix des domaines de variation et des lois de distribution

Le domaine de variation et la loi de distribution (ex : Gaussienne, Uniforme, Beta) de chacune des variables de conception sont ensuite définis. En conception, afin de favoriser l'exploration de l'ensemble du domaine de conception des lois de distribution uniforme sont à privilégier. Des limites de variation (seuil minimum et seuil maximum) sont alors définies pour chacune des variables considérées selon le projet étudié et son contexte. Le recours à l'expertise est nécessaire pour rester dans un domaine de conception réalisable vis-à-vis des produits de construction existants.

Étape 4 : Construction du métamodèle

La construction du métamodèle est ensuite exécutée. L'échantillonnage est effectué en faisant varier aléatoirement les variables de décision selon leur loi de distribution. Les modèles correspondants sont affectés puis simulés en ayant éventuellement recours à une ferme de calcul. À partir de cet échantillon, le métamodèle correspondant, basé sur la méthode du chaos polynomiale est alors construit. L'enjeu lors de la construction d'une surface de réponse est de trouver un bon compromis entre la précision des prédictions du métamodèle, et le nombre de simulations nécessaire à sa construction.

Pour déterminer le meilleur ordre p , la démarche de construction de métamodèle des travaux de Merheb (2013) a été employée. L'échantillon est divisé en deux parties: une base d'apprentissage (90% de l'échantillon) et une base de validation (10% de l'échantillon). La construction du métamodèle est faite avec la base d'apprentissage puis est validée ou rejetée avec la base de validation. Le métamodèle construit est alors évalué selon deux indicateurs d'erreur : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error*) et l'erreur absolue maximale (*Maximal Absolute Error*) respectivement notés $RMSE$ et MAE et exprimés selon les équations [IV.24] et [IV.25]. L'ordre p du polynôme est progressivement augmenté jusqu'à ce que l'erreur $RMSE$ de l'ordre suivant $p+1$ augmente, signifiant que la taille de l'échantillon n'est pas suffisante pour construire un polynôme d'ordre supérieur. L'objectif est alors d'augmenter conjointement le degré du polynôme p et la taille de l'échantillon N jusqu'à ce les indicateurs d'erreur du métamodèle soient inférieurs à des seuils $RMSE_{lim}$ et MAE_{lim} préalablement fixés.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [f(\vec{X}^{(i)}) - \mathcal{M}(\vec{X}^{(i)})]^2} \quad [IV.24]$$

$$MAE = \max(|f(\vec{X}^{(1)}) - \mathcal{M}(\vec{X}^{(1)})|, \dots, |f(\vec{X}^{(i)}) - \mathcal{M}(\vec{X}^{(i)})|, \dots, |f(\vec{X}^{(N)}) - \mathcal{M}(\vec{X}^{(N)})|) \quad [IV.25]$$

La construction du métamodèle doit permettre de calculer les indices de sensibilité totaux S_{T_i} . Ces indices nécessitent au moins le calcul d'un polynôme de degré 2 pour déterminer l'effet des interactions entre variables. La taille de l'échantillon devra donc être suffisante pour passer à un degré 2.

L'ensemble de ces critères doit être respecté avec une durée de calcul raisonnable par rapport à la durée totale de la phase de conception du projet. Le concepteur doit donc fixer une durée de calcul maximale t_{max} qui impactera directement la taille de l'échantillon maximal (N_{max}). Le temps de calcul t_{calcul} dépend du temps relatif à une simulation t_{sim} , de la taille de l'échantillon N et du nombre de travaux (simulations) réalisés en parallèle N_{sim} . En négligeant les durées de traitement additionnelles, le temps de calcul nécessaire à la construction d'un métamodèle peut être approché selon l'équation [IV.26].

$$t_{calcul} \approx \frac{t_{sim}}{N_{sim}} \times N \quad [IV.26]$$

Pour obtenir le meilleur compromis « précision/temps de calcul », un organigramme a donc été programmé et est présenté en Figure 55. Si la limite de temps impartie est atteinte sans que la précision souhaitée ne soit respectée par le métamodèle, l'étape suivante consiste alors à réduire la complexité du métamodèle. Dans le cas contraire, le métamodèle obtenu est satisfaisant et peut être utilisé pour modéliser les fonctions-objectif.

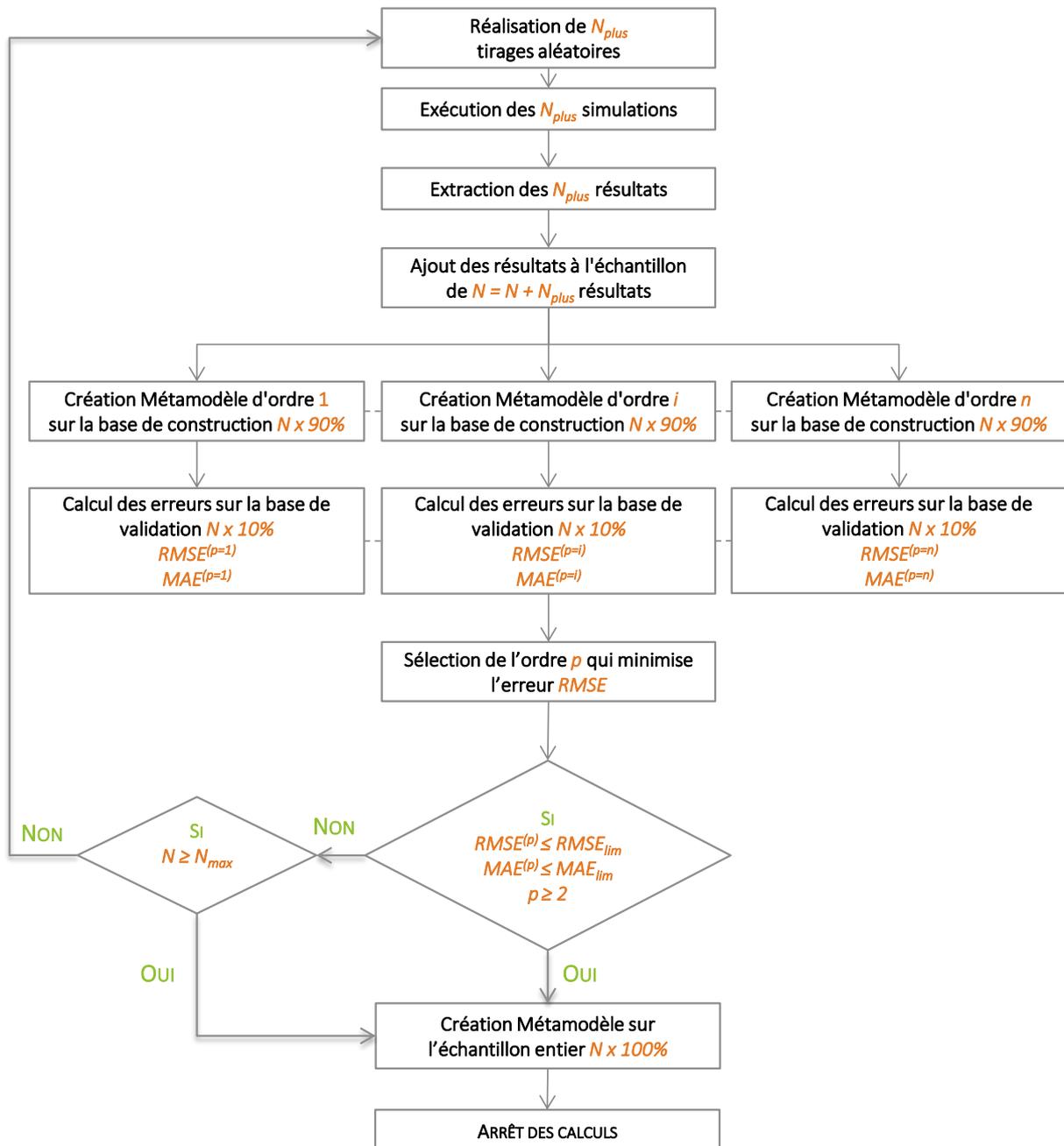


Figure 55 : Organigramme de création du métamodèle

Le fonctionnement de l'algorithme est le suivant :

- Une série de N_{plus} simulations est réalisée à partir d'un tirage aléatoire des paramètres de conception dans leur intervalle de variation.

- Les résultats sont ajoutés à la base principale (échantillon) composée des N résultats des itérations précédentes.
- n métamodèles d'ordre 1 à n sont générés à partir de 90% de la base principale (base de construction).
- Pour chacune des n surfaces de réponse les erreurs $RMSE$ et MAE sont calculées par rapport au 10% de la base restante (base de validation).
- L'ordre optimal est déterminé en fonction des résultats des erreurs $RMSE$ et MAE pour les n métamodèles.
- Si les erreurs du métamodèle optimal sont considérées acceptables et que l'ordre est supérieur à p , l'algorithme génère le métamodèle sur l'échantillon complet et stoppe le calcul.
- Si les erreurs du métamodèle optimal ne sont pas acceptables, mais que la taille de l'échantillon maximal N_{max} correspondant au temps de calcul maximum t_{max} est atteinte, l'algorithme génère le métamodèle sur l'échantillon complet et stoppe le calcul.
- Si les erreurs maximales souhaitées du métamodèle optimal ne sont pas obtenues et que la taille de l'échantillon maximal n'est pas atteinte, une nouvelle série de N_{plus} simulations sont réalisées.

L'algorithme a été programmé sous Python à partir de la bibliothèque logicielle OpenTURNS® (OpenSource Treatment of Uncertainty, Risk 'N Statistics) qui est dédiée au traitement des incertitudes. Cette bibliothèque est issue d'une collaboration de trois entreprises : Electricité de France (EDF), European Aeronotic Defense and Space (EADS) et Phimacea. Elle intègre une boîte à outils permettant de construire des métamodèles par la méthode des polynômes du chaos (Dutka-Malen et al. 2009). Cet outil est en libre-service³² et utilise Python, un code de programmation flexible et facile d'utilisation. De plus le couplage de Python/OpenTURNS au logiciel EnergyPlus a déjà été réalisé dans les travaux de Merheb (2013).

Étape 5 : Réduction de la complexité du métamodèle par analyse de sensibilité

Les moyens informatiques et la technique de construction (Polynôme du Chaos) utilisés pour la génération du métamodèle sont considérés fixes. L'unique possibilité pour répondre aux exigences non respectées à l'étape précédente est de réduire la taille du domaine de conception. Il s'agit alors de réduire le nombre de variables de conception considérées à l'étape 2 et/ou de diminuer les plages de variation fixées à l'étape 3. Cette étape consistant à réduire la complexité du métamodèle peut passer par une analyse de sensibilité globale grâce aux indices de Sobol déterminés selon l'équation [IV.21] page 123 à partir du métamodèle insuffisamment précis construit à l'étape 4. Toutefois il est nécessaire de s'assurer que les valeurs des indices de Sobol ont convergé durant l'étape 4. Si ce n'est pas le cas d'autres méthodes devront être utilisées pour réduire le nombre de variables de conception (autre méthode d'analyse de sensibilité ou expertise).

³² Bibliothèque OpenTurns téléchargeable sur le site internet : <http://www.openturns.org>

IV.2.e Construction des métamodèles nécessaires au cas d'étude

Dans un premier temps, le cas d'étude a été saisi dans le modèle numérique d'EnergyPlus selon l'Étape 1. Les variables de conception envisagées ont ensuite été définies puis désignées dans le fichier de simulation tel que décrit dans l'étape 2. Enfin des lois de distribution uniforme correspondant au domaine de variation continue sont associées à chacune des variables envisagées selon les valeurs basses (VB) et hautes (VH) définies dans le Tableau 11. Les métamodèles correspondant sont alors construits. Les temps de simulation nécessaire à l'évaluation des besoins de chauffage (du 01/10 au 31/05) et des degrés-heure d'inconfort estival (du 01/06 au 31/09) sont respectivement de 8 secondes et de 6 secondes pour un ordinateur cadencé à 3,5 GH.

Afin d'identifier les variables significatives, une analyse de Sobol a été réalisée. Pour cela les indices de Sobol de premier ordre et d'ordre total maximum ont été calculés à partir des métamodèles. D'après la Figure 56 les indices de Sobol maximum n'évoluent plus au-delà d'un échantillon constitué de 1000 évaluations. Les deux métamodèles sont alors d'ordre 3, ce qui est suffisant pour déterminer les indices d'ordre total. L'obtention des indices de Sobol a donc permis d'effectuer une analyse de sensibilité présentée dans la section III.5.b. Le nombre de variables a donc été réduit de 18 à 8 pour le métamodèle correspondant à l'inconfort thermique estival et de 20 à 7 pour celui des besoins de chauffage.

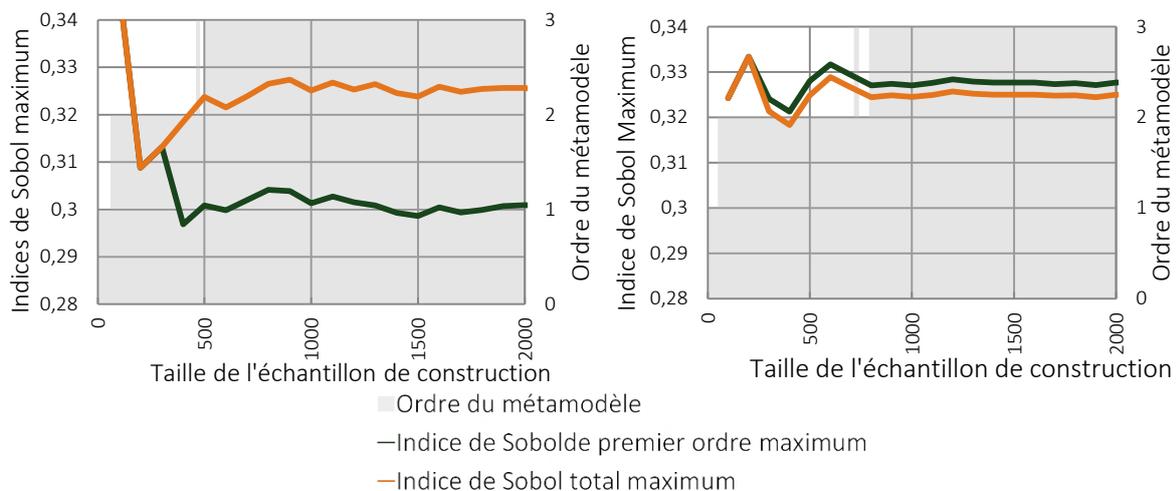


Figure 56 : Convergence des indices de Sobol de premier ordre et d'ordre total maximum calculés à partir des métamodèles correspondant aux degrés-heure d'inconfort estival (gauche) et aux besoins de chauffage (droite) en tenant compte respectivement de 18 et 20 variables

De nouveaux métamodèles ont ensuite été construits à partir de la sélection des variables significatives réalisée dans la section III.5.b. Deux échantillons de 5 000 et 10 000 simulations ont été évalués pour construire respectivement les métamodèles correspondant aux besoins de chauffage et aux degrés-heure d'inconfort estival. 90% de ces échantillons ont servi à la construction des métamodèles et 10% à leur validation. Les erreurs RMSE obtenues à l'issue des évaluations sont de 0,05 kWh/(m².an) pour les besoins de chauffage (Figure 57) et de 10 °C.h pour les degrés-heure d'inconfort estival (Figure 59). Les erreurs MAE sont respectivement de 0,2 kWh/(m².an) (Figure 58) et de 70 °C.h (Figure 60). Pour les deux métamodèles, l'ordre du polynôme obtenu est de degrés 6.

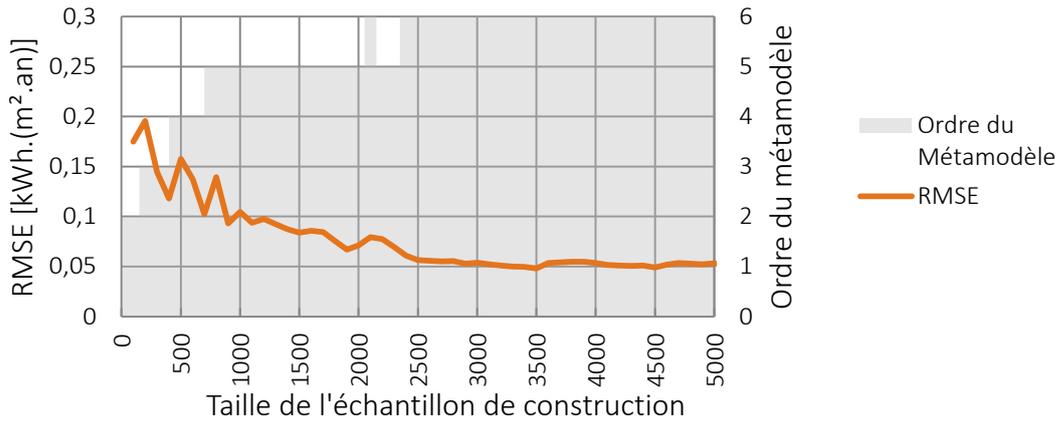


Figure 57 : Évolution de l'erreur RMSE et de l'ordre du métamodèle des besoins de chauffage (7 variables) selon la taille de l'échantillon

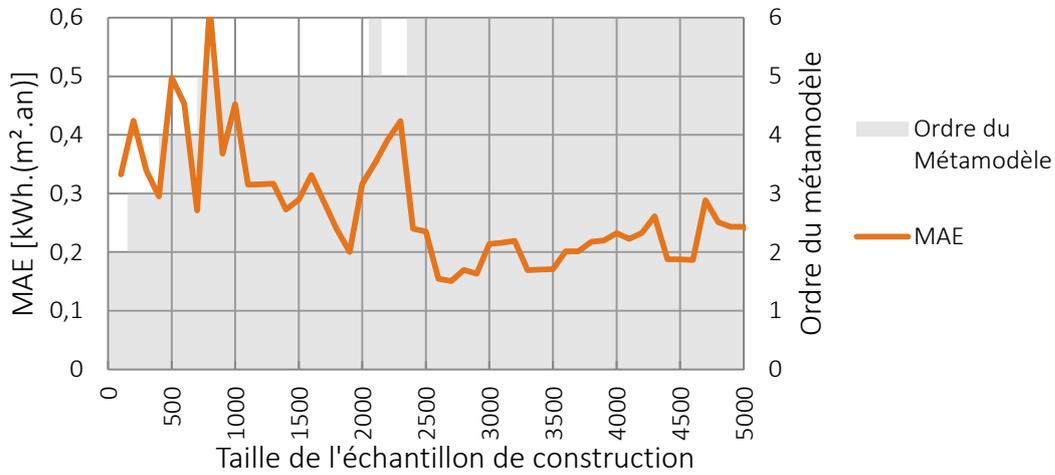


Figure 58 : Évolution de l'erreur MAE et de l'ordre du métamodèle des besoins de chauffage (7 variables) selon la taille de l'échantillon

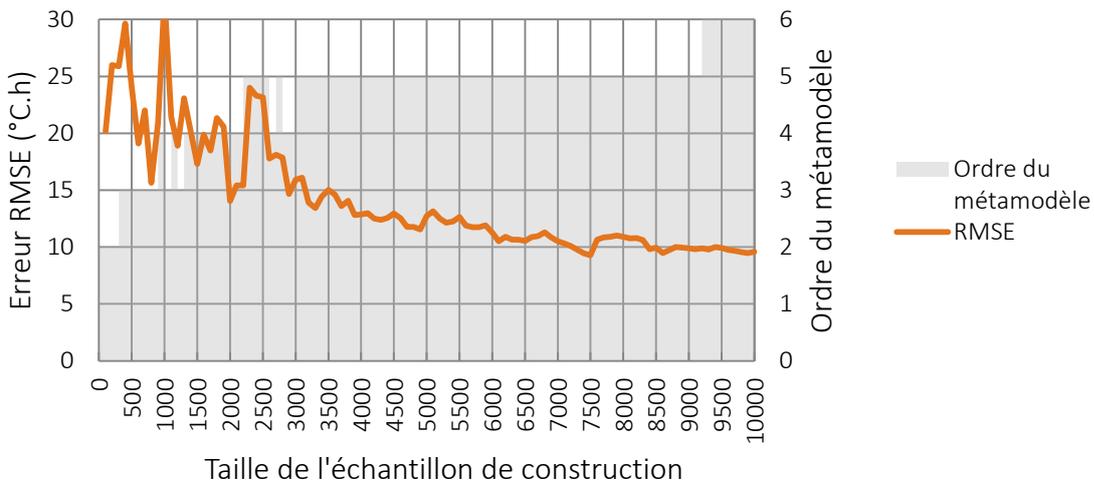


Figure 59 : Évolution de l'erreur RMSE et de l'ordre du métamodèle des degrés-heure d'inconfort estival (8 variables) selon la taille de l'échantillon

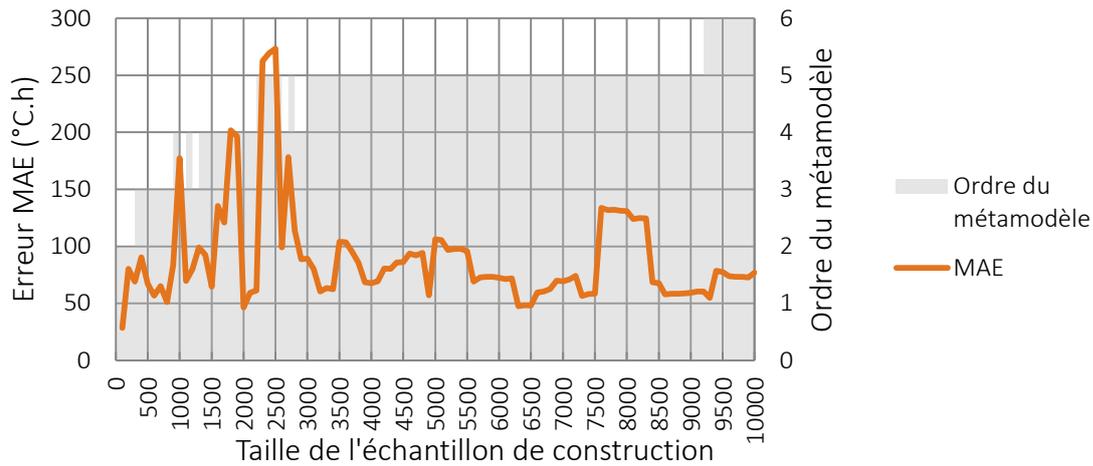


Figure 60 : Évolution de l'erreur MAE et de l'ordre du métamodèle des degrés-heure d'inconfort estival (8 variables) selon la taille de l'échantillon

En comparaison, les erreurs RMSE obtenues à l'issue des évaluations sont supérieures à 0,15 kWh/(m².an) avec 20 variables pour les besoins de chauffage (Figure 61) et à 15 °C.h avec 18 variables pour les degrés-heure d'inconfort estival (Figure 63). Les erreurs MAE sont globalement plus élevées et fluctuent plus intensément (Figure 62 et Figure 64). La réduction du nombre de variables a donc permis l'obtention de métamodèles plus précis et pouvant être calculés avec un échantillon de plus petite taille.

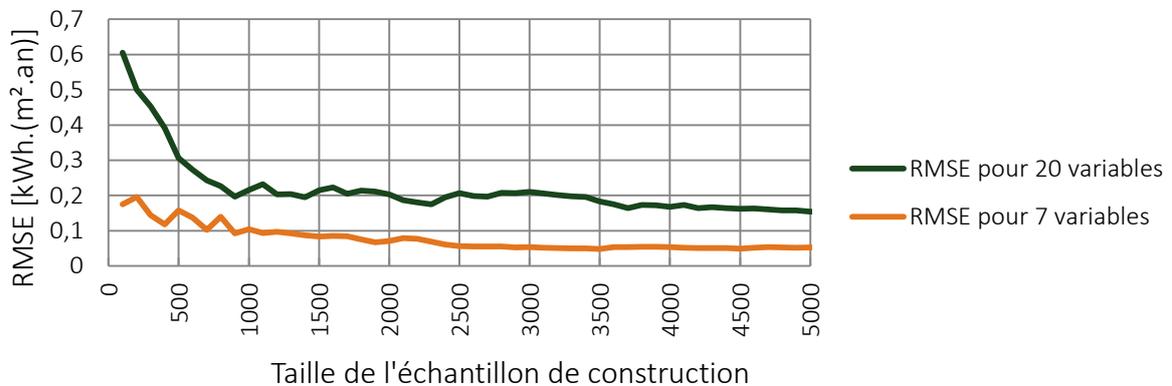


Figure 61 : Évolution de l'erreur RMSE des métamodèles des besoins de chauffage avec 7 et 20 variables selon la taille de l'échantillon

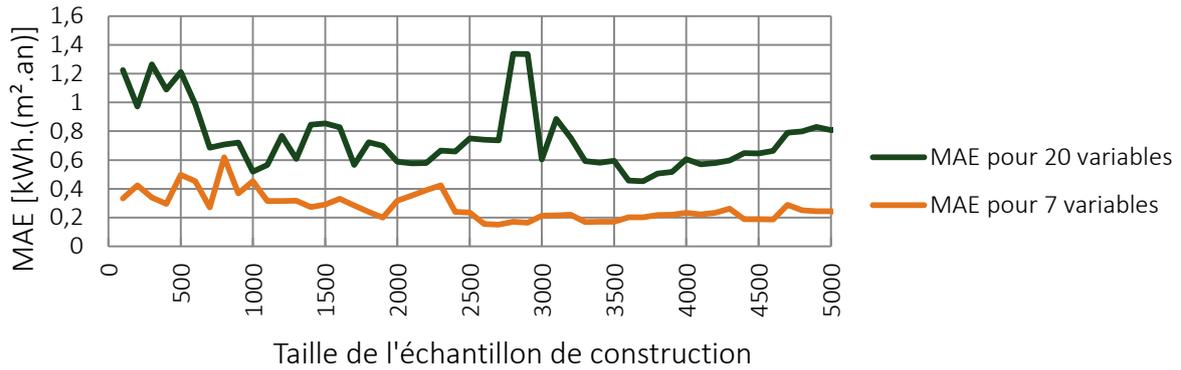


Figure 62 : Évolution de l'erreur MAE des métamodèles des besoins de chauffage avec 7 et 20 variables selon la taille de l'échantillon

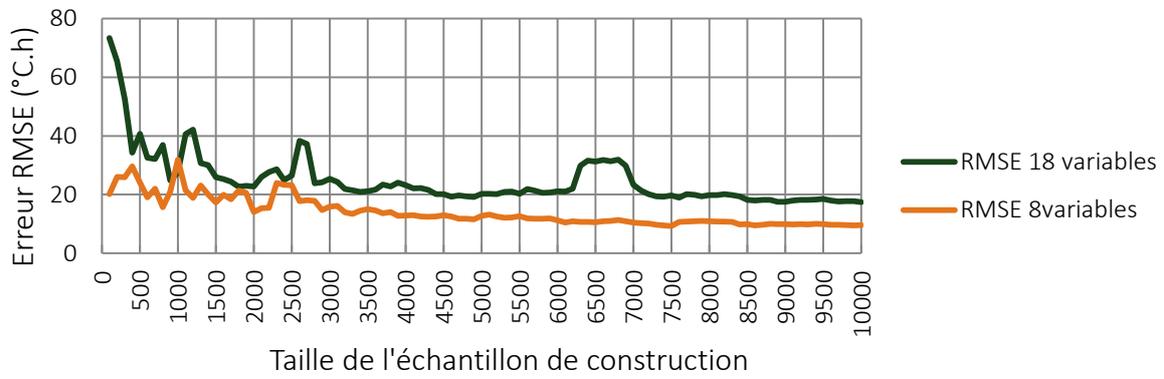


Figure 63 : Évolution de l'erreur RMSE des métamodèles des degrés-heure d'inconfort estival avec 7 et 20 variables selon la taille de l'échantillon

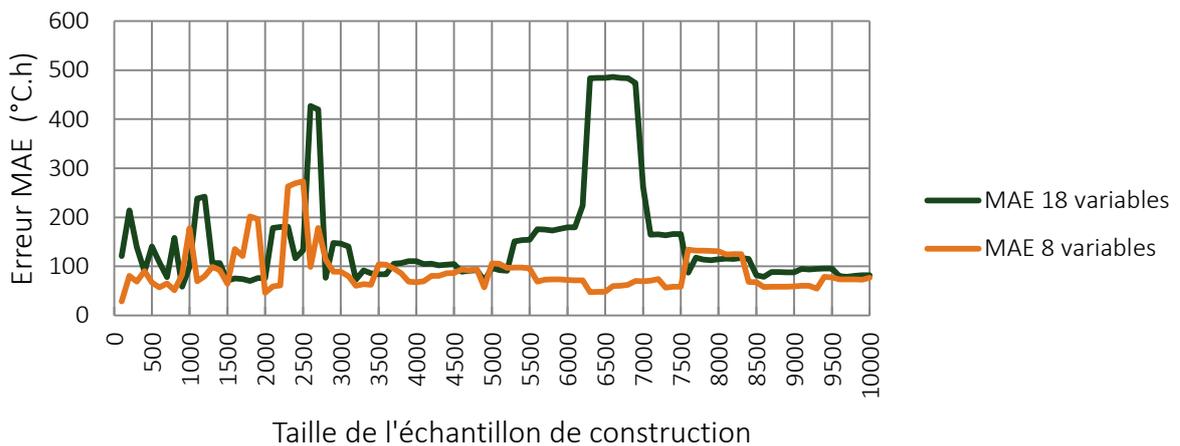


Figure 64 : Évolution de l'erreur MAE des métamodèles des besoins de chauffage avec 7 et 20 variables selon la taille de l'échantillon

Finalement la difficulté réside dans les choix des erreurs RMSE et MAE limites acceptables sans lesquels il est difficile d'automatiser l'algorithme de création du métamodèle présenté en Figure 55. Pour l'étude d'optimisation, les métamodèles correspondant aux besoins de chauffage et aux degrés-heure d'inconfort estival obtenus respectivement avec 7 et 8 variables

et construits avec un échantillon de 5 000 et 10 000 simulations sont conservés. Par la suite, l'ensemble des solutions obtenues par optimisation est vérifié avec le modèle numérique d'EnergyPlus. Les résultats des métamodèles choisis sont également comparés avec ceux de métamodèles construits avec un nombre de simulations réduit.

IV.3. Fonction-objectif en lien avec le potentiel de réchauffement climatique et énergie grise

Les fonctions-objectif *énergie grise de l'enveloppe* (F_{eg}) et *potentiel de réchauffement climatique de l'enveloppe* (F_{prc}) consistent respectivement à minimiser l'énergie grise (E_g) et le potentiel de réchauffement climatique (Prc) du système constructif sur une durée de vie définie.

Pour définir l'indicateur d'énergie grise, il est important de distinguer les types d'énergie qui composent un matériau et leur origine (Figure 65) (Cornillier and Vial 2008). L'énergie-procédé, consommée lors des processus de fabrication, de transport, de mise en œuvre, de démantèlement et de fin de vie se différencie alors de l'énergie-matière contenue dans la matière. Chacune de ces deux énergies peut être d'origine renouvelable ou non renouvelable.

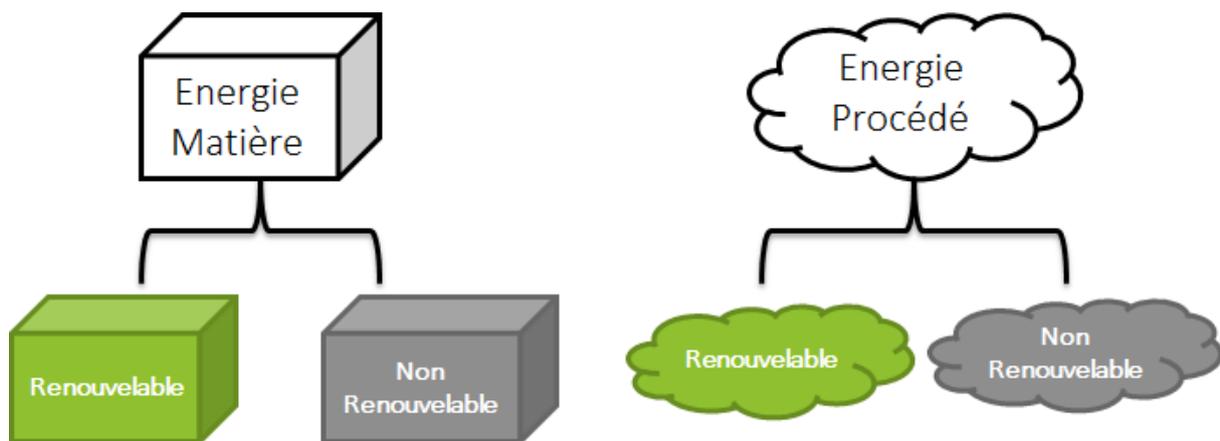


Figure 65 : Décomposition de l'énergie primaire en énergie matière et énergie procédé renouvelable ou non renouvelable

En fin de vie, l'énergie-matière du bois utilisé dans la structure d'un bâtiment est valorisable en tant que matière première secondaire sous forme d'énergie. En effet, le bois comporte une forte quantité d'énergie-matière relativement à l'énergie-procédé. Par exemple pour du bois massif de structure en pin maritime, l'énergie-matière représente près de cinq fois l'énergie-procédé (Figure 66). L'objectif ici est alors de minimiser l'énergie procédé qui a été nécessaire sur tout le cycle de vie du produit hors vie en œuvre.

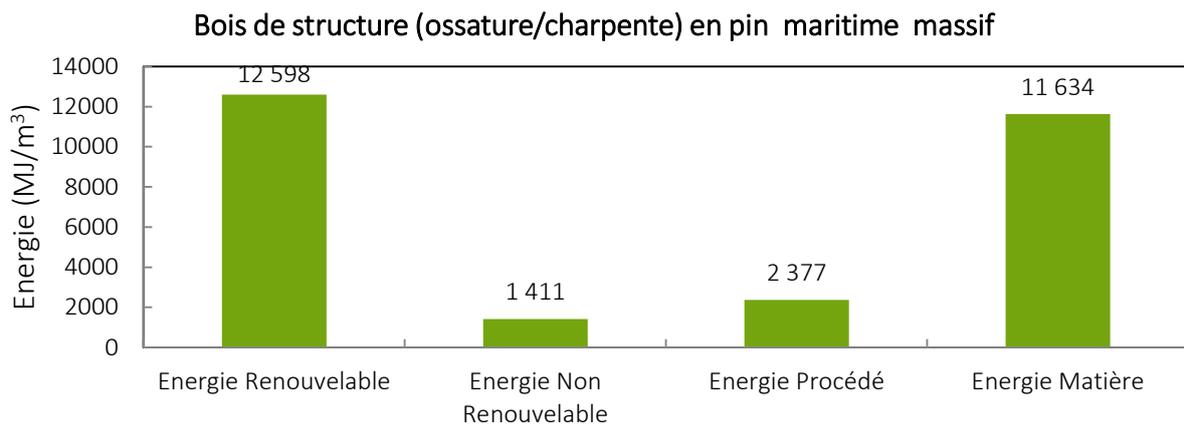


Figure 66 : Données environnementales concernant les indicateurs énergétiques du bois de structure en pin maritime massif provenant de la FDES n° 08-248 :2011

Dans cette approche, la définition de l'énergie grise adoptée est donc celle proposée par l'ICEB (Institut pour la Conception Écoresponsable du Bâti) (Iceb 2012) : il s'agit de l'énergie procédé (apport d'énergie nécessaire dans un processus) d'origine renouvelable et non renouvelable sur toute la durée de cycle de vie hors vie en œuvre.

Les données employées proviennent de fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) réalisées selon l'ancienne norme française NF P 01-010 (AFNOR 2004a) ou la nouvelle norme NF EN 15804 (AFNOR 2012). Il est à noter que dans la nouvelle norme les indicateurs d'énergie primaire renouvelable et non renouvelable ne comptabilisent que l'énergie procédé. Il suffit donc d'additionner ces deux indicateurs pour obtenir l'énergie procédé. L'énergie matière est alors considérée dans des indicateurs relatifs à l'épuisement de ressources non renouvelables ou à la consommation de matières renouvelables. Dans l'ancienne norme, l'indicateur de l'énergie procédé peut être utilisé directement. Les indicateurs de l'énergie primaire totale, de l'énergie renouvelable et de l'énergie non renouvelable comptabilisent de l'énergie-procédé et de l'énergie-matière. Les FDES peuvent être récupérées sur la base nationale française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires, équipements et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages (Inies 2015).

Les fonctions-objectif *énergie grise de l'enveloppe* (F_{eg}) et *potentiel de réchauffement climatique de l'enveloppe* (F_{prc}) consistent donc à minimiser la somme des impacts de chaque matériau utilisé pondéré à sa quantité. Les résultats sont alors ramenés au mètre carré habitable (Équation [IV.27] et [IV.28]).

$$F_{eg} : \min \left(\frac{\sum_i E_{g_i} * Q_i}{Shab} \right) \quad [IV.27]$$

où :

- E_{g_i} est l'énergie grise du matériau i en MJ/m³ ou MJ/m²
- Q_i la quantité du matériau i en m³ ou m²
- $Shab$ est la surface habitable en m²

$$F_{Prc} : \min \left(\frac{\sum_i Prc_i * Q_i}{Shab} \right) \quad [IV.28]$$

où :

- Prc_i est le potentiel de réchauffement climatique du matériau i en $CO_{2_{equ}}/m^3$ ou $CO_{2_{equ}}/m^2$

IV.4. Descriptions des contraintes liées au dimensionnement de l'ouvrage

Dans ces travaux les contraintes mécaniques considérées sont les contraintes relatives à l'*Eurocode 5*. Il s'agit de vérifier que la structure n'atteint ni un État Limite Ultime (ELU) ni un État Limite de Service (ELS). La résistance au feu est incluse dans l'*Eurocode 5* et est également une contrainte considérée. Le but est de réaliser un prédimensionnement de la structure. Les contraintes sont alors considérées en tenant compte de certaines hypothèses simplificatrices. Le risque sismique n'est pas considéré dans cette étude.

Le système constructif d'un bâtiment peut être décomposé en sous-systèmes comprenant des éléments verticaux et horizontaux (Figure 67).

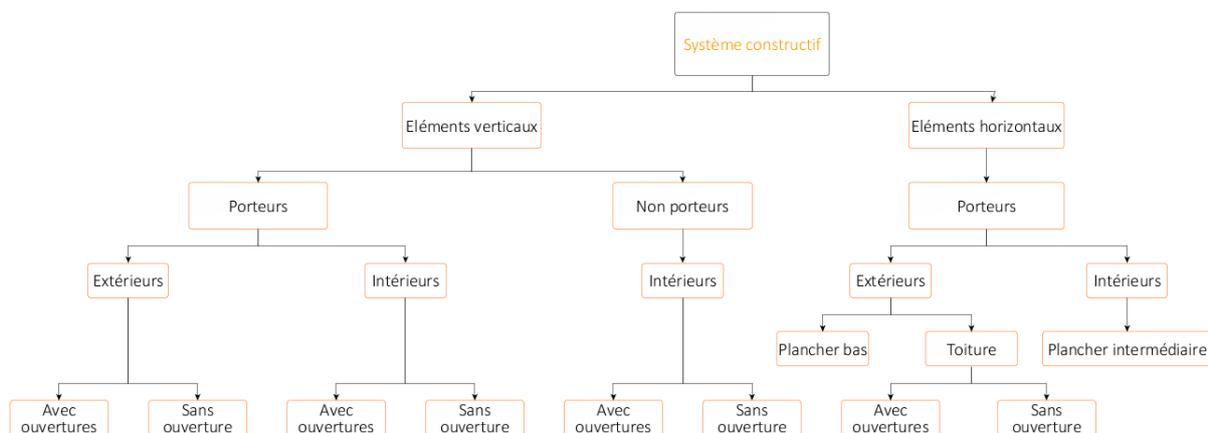


Figure 67 : Décomposition du système constructif en sous-systèmes porteurs et non porteurs

Les sous-systèmes porteurs suivants ont été retenus pour la vérification des contraintes mécaniques :

- éléments verticaux porteurs ;
- éléments de toiture ;
- éléments de plancher intermédiaire.

Des modules de vérification des contraintes ont donc été réalisés pour deux configurations types correspondant à chacun de ces sous-systèmes (Garnesson 2014). Ces configurations sont composées de divers éléments pouvant jouer un rôle porteur et nécessitant des calculs de prédimensionnement.

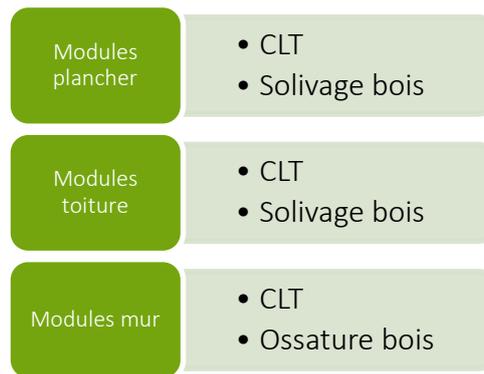


Figure 68 : Modules de vérification des contraintes mécaniques

Un module prend la forme d'un tableur Excel. Un premier volet permet de renseigner les constantes propres à un projet qui ne peuvent varier d'une solution à l'autre. Il peut s'agir de la catégorie d'exploitation du bâtiment au sens des Eurocodes, son exigence de stabilité au feu ou encore la portée des planchers et toitures. Un second volet permet de saisir les données variables comme l'épaisseur du revêtement intérieur d'un mur, le nombre de plis d'un panneau CLT ou bien l'épaisseur des montants d'un mur à ossature bois. Ces variables permettent de définir toutes les alternatives de parois qui peuvent être rencontrées lors de l'optimisation. En considérant l'ensemble de ces données, le tableur vérifie différents critères de dimensionnement relatifs aux Eurocodes. À l'issue d'un module, pour chaque critère de dimensionnement, il est alors possible de récupérer une fonction analytique composée de constantes et de variables. Selon l'ensemble de ces données, chaque fonction analytique retourne une valeur inférieure à 1 lorsque l'élément considéré respecte la contrainte et supérieure à 1 lorsque l'état limite est dépassé. Il s'agit alors de sélectionner les états limites dimensionnant par élément pour limiter le nombre de fonctions analytiques à considérer. Les contraintes C_i peuvent alors être représentées selon l'équation [IV.29].

$$G_i : C_i(\vec{X}) - 1 \leq 0$$

où :

- $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathfrak{R}^n$ est le vecteur des variables de décision
- $G_i : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ pour $i = 1, \dots, s$ sont les contraintes du problème
- $C_i : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ pour $i = 1, \dots, s$ sont les critères de prédimensionnement

[IV.29]

La méthode d'optimisation développée a pour but de fournir au concepteur une aide quant à la détermination des systèmes constructifs optimaux. Il ne s'agit pas de dimensionner la structure. L'aspect mécanique est donc abordé suivant une démarche de prédimensionnement. Plusieurs hypothèses sont faites lors de la réalisation des modules et l'étude des assemblages mécaniques entre éléments n'est pas réalisée.

Comme cela a déjà été abordé pour l'évaluation du confort vibratoire des planchers, le bois lamellé croisé n'est pas un matériau dont il est fait référence dans l'*Eurocode 5*. La réalisation des modules basés sur des éléments CLT s'appuie donc sur les recommandations fournies par le Manuel CLT (FPInnovations 2011).

IV.4.a Modules mécaniques des planchers intermédiaires

Un plancher est conçu pour reprendre des charges permanentes qui ont pour origine son propre poids. Le poids propre d'un plancher prend en compte la présence des éléments structuraux, mais également celle des différents composants de la paroi tels que le revêtement de sol et le complexe de faux plafond. À ces charges s'ajoutent des charges d'exploitation définies par l'Eurocode 1 fonction de l'utilisation du bâtiment. Ces charges, permanentes et d'exploitation, agissent perpendiculairement au plan du plancher. Les modules permettent de vérifier la résistance des éléments pour des sollicitations en flexion et en cisaillement en situations courantes. Dans certains cas, les planchers ont une fonction de diaphragme qui joue un rôle important dans le contreventement du bâtiment. Les sollicitations engendrées par cette fonction ne sont pas prises en compte par le module dont l'objectif est de proposer un prédimensionnement. De même, les sollicitations sismiques ne sont pas considérées.

Les modules prennent en compte la vérification de la stabilité au feu. Les combinaisons d'actions permettant de déterminer les sollicitations agissant sur les éléments de plancher lorsqu'une situation incendie est étudiée sont différentes de celles utilisées en situation normale. Ces combinaisons donnent des sollicitations plus faibles en cas d'incendie. Les modules réalisés ne se basent pas sur ces combinaisons et utilisent une méthode simplificatrice qui se justifie par la démarche de prédimensionnement dont fait l'objet la méthode d'optimisation développée. Selon l'une des préconisations de l'Annexe Nationale, les sollicitations en situation incendie sont réduites de 30% par rapport à celles qui agissent en situation normale (AFNOR 2010a).

Le contrôle des déformations fait l'objet d'un critère ELS vérifié par les modules. Les Eurocodes, par le biais de ce critère limitent la déformation des éléments structuraux en fonction des exigences des éléments supportés. Dans ces travaux de thèse, les recommandations standard de l'Eurocode 5 et son Annexe Nationale seront suivies en considérant une flèche maximale instantanée due aux actions variables ainsi qu'une flèche finale prenant en compte le fluage induite par les actions variables et permanentes.

Les contraintes et hypothèses retenues concernant la résistance des éléments en flexion, en cisaillement, en situation normale ou en situation incendie ainsi que les déformations résultant du fluage sont détaillées dans l'Annexe D.

Enfin, les planchers sont des éléments structuraux soumis à des sollicitations dynamiques. Les vibrations induites peuvent alors occasionner une gêne pour l'utilisateur du bâtiment. Les Eurocodes prennent en compte ce phénomène par le biais d'un critère ELS relatif au confort vibratoire. La vérification de ce critère est également intégrée aux modules et est décrite dans l'Annexe C.

Pour l'ensemble des modules de planchers, la chape en béton n'est pas nécessairement présente. Il en va de même pour le complexe d'isolant et les divers revêtements.

Pour les planchers à solives, un renforcement transversal peut également être considéré. Ce type de dispositif est utilisé pour réduire la déformation d'un plancher à solives sous charge ponctuelle. Le renforcement transversal permet de reprendre une partie de la charge localisée

sur la solive la plus chargée et la redistribuer sur les solives adjacentes. Différentes techniques (lambourdes, entretoises ou feuillard) peuvent être employées.

IV.4.b Modules mécaniques des toitures

Dans le multiétage, les toitures-terrasses sont fréquemment utilisées. C'est ce type de toiture qui est retenu pour l'élaboration des modules. Elles sont considérées comme non accessibles. Les opérations de maintenance sont tout de même prises en compte. Comme les planchers, les toitures sont amenées à supporter des sollicitations verticales provenant des charges permanentes et d'exploitation. À celles-ci s'ajoutent les sollicitations provenant des charges de neige et de vent. La prise en compte de ces dernières relève, lors du dimensionnement d'une structure, d'un calcul assez lourd qui doit prendre en compte un nombre important de paramètres. Pour réduire le temps de calcul, les concepteurs ont fréquemment recours à des logiciels spécialisés. Dans le cadre de l'élaboration de la méthode d'optimisation, où tous les paramètres du bâtiment ne sont pas encore connus, la démarche de prédimensionnement justifie certaines hypothèses qui sont détaillées dans l'Annexe E.

Les critères ELU et ELS que vérifient les modules dédiés aux toitures sont les mêmes que pour les planchers mis à part pour le contrôle des vibrations qui n'est dans ce cas pas nécessaire. Annexe D.

IV.4.c Modules mécaniques des murs

Les principales fonctions d'un mur sont d'isoler l'occupant du milieu extérieur et de supporter les charges provenant des niveaux supérieurs. Ils peuvent être amenés à reprendre les planchers, d'autres murs, la toiture ainsi que les sollicitations climatiques directes et transmises. Deux types de charges sont alors à considérer. Des sollicitations verticales proviennent des charges permanentes, des charges d'exploitation sur planchers et toiture et des charges de neige et de vent qui agissent en toiture. Des sollicitations horizontales sont également à considérer. Celles-ci proviennent des charges de vent qui agissent perpendiculairement au plan du mur. La fonction de contreventement des murs n'est pas étudiée dans cette démarche de prédimensionnement pour les mêmes raisons que la fonction diaphragme des planchers n'est pas analysée. Le contreventement reste un aspect à intégrer au prédimensionnement.

Contrairement aux autres types de parois, aucun critère ELS n'est vérifié pour les murs dans les modules de prédimensionnement réalisés. Les déformations seront supposées suffisamment faibles pour ne pas être dimensionnantes. C'est le cas si la hauteur du bâtiment reste limitée ou si le ratio d'ouvrant est faible.

Les sollicitations verticales dues aux charges permanentes, d'exploitation de neige et de vent entraînent une contrainte de compression qui agit sur le panneau CLT (Annexe E). Les sollicitations horizontales dues aux charges de vent ont pour conséquence de fléchir les panneaux et imposent également une contrainte de cisaillement. Les panneaux sont alors sollicités par une combinaison de flexion et compression ainsi que par une contrainte de cisaillement (Annexe D).

Les modules sont en mesure de prendre en compte l'intégration d'ouverture dans la paroi. Lorsqu'une ouverture est présente, les charges verticales sont reprises par le linteau assimilable à une poutre fléchie se trouvant au-dessus de celle-ci. La présence du linteau permet de redistribuer les charges verticales de part et d'autre de l'ouverture. De manière simplifiée, les modules considèrent que le report des charges verticales se fait sur une longueur de 1 m de chaque côté de l'ouverture. Les vérifications se font alors dans ces zones où les charges sont les plus importantes. Pour le mur à ossature bois, deux montants sont considérés placés de chaque côté de l'ouverture.

L'ensemble des complexes isolants et les revêtements ne sont pas nécessairement tous présents, leur épaisseur peut donc être nulle. Le panneau de contreventement du module à ossature bois peut également être positionné côté extérieur entre les montants d'ossature et la surépaisseur d'isolation extérieure.

IV.4.d Contraintes et hypothèses considérées dans le cas d'étude

Hypothèses relatives aux calculs de structure

Les structures des balcons et des escaliers sont autoportées et ne sont donc pas considérées dans les calculs de prédimensionnement.

Les charges d'exploitations du bâtiment sont définies selon son usage à partir de valeurs tabulées disponibles dans l'Eurocode 1. Pour un logement, en plancher, une charge surfacique $q_k=1,5$ kN/m² et une charge ponctuelle de $Q_k=2$ kN ont alors été considérées. En toiture, la charge considérée correspond à une toiture plate (pente $\leq 15\%$) et non accessible avec des charges respectivement $q_k=0,8$ kN/m² (limités à 10 m²) et $Q_k=1,5$ kN.

À partir de la localisation géographique du bâtiment, il est possible de définir des charges de neige et des charges de vents. Bordeaux (altitude 22m) correspond à la zone de neige A2 et de vent n°1. Divers coefficients nécessaires à l'estimation des charges variables sont alors déterminés selon des valeurs tabulées données par l'Eurocode 1 (AFNOR 2004b; AFNOR 2010b). Les charges de vent et de neige sur la toiture et les murs sont ensuite calculées selon les hypothèses définies en Annexe E.

Ces logements constituent un bâtiment de deuxième famille au sens de la réglementation incendie et doivent respecter une résistance au feu de 30 minutes.

Liste des contraintes considérées pour le prédimensionnement des éléments

Dans le cas d'étude, les contraintes mécaniques suivantes ont été considérées :

- Le confort vibratoire des planchers doit obtenir un niveau de confort vibratoire inférieur à 4 et calculé selon l'équation [IV.1] page 133.
- La lisse basse des murs à ossature bois est vérifiée pour la compression perpendiculaire au fil et doit respecter la contrainte [D. 33] page 245.
- Les panneaux CLT et les montants d'ossature utilisée en mur porteur sont vérifiés vis-à-vis de la combinaison des contraintes de compression et flexion avec risque de flambement selon les équations [D. 29] et [D. 30] page 243 en situation normale et incendie.
- Les planchers à solives ont également été dimensionnés en flexion en situation incendie et selon l'équation [D. 14] page 237.

IV.5. Conclusion sur la méthodologie d'optimisation multiobjectif développée

La méthodologie développée vise l'optimisation multiobjectif de la composition de système constructif en bois adaptés à des bâtiments multiétages en traitant simultanément les besoins de chauffage, le confort thermique estival, le confort vibratoire des planchers intermédiaires et l'impact environnemental du clos couvert :

- La fonction-objectif du confort vibratoire des planchers minimise le niveau d'inconfort et est modélisée sous la forme d'une fonction analytique [IV.1] page 133. Elle s'appuie sur les recommandations de l'*Eurocode 5* et du *Manuel CLT*.
- Deux fonctions-objectif de thermique nécessitant le recours à des modèles de calculs détaillés sont également considérées. Les besoins de chauffage annuels et les degrés-heure d'inconfort en saison estivale sont alors à minimiser. Afin de diminuer les temps nécessaires aux calculs thermiques dynamiques, l'usage de métamodèles précis a été adopté pour modéliser ces deux fonctions-objectif ([IV.4] et [IV.5] page 135)
- L'impact environnemental est pris en compte par la minimisation de l'énergie grise [IV.27] page 153 et du potentiel de réchauffement climatique du clos couvert [IV.28] page 154. Des données provenant de FDES ont été utilisées (Inies 2015).

Le prédimensionnement aux Eurocodes est intégré sous forme de fonctions analytiques représentatives de contraintes mécaniques choisies et issues de modules préalablement établis sur tableur [IV.29].

L'approche d'optimisation développée peut être représentée par un logigramme composé de trois étapes successives elles-mêmes constituées de sous étapes (Figure 69).

La mise en œuvre de l'optimisation multiobjectif nécessite le choix d'une méthode d'optimisation adaptée. Ce choix doit tenir compte de la nature discontinue des fonctions-

objectif à optimiser qui dépend de l'hétérogénéité des variables. Les contraintes à respecter sont également considérées. Ce choix est abordé dans le chapitre suivant.

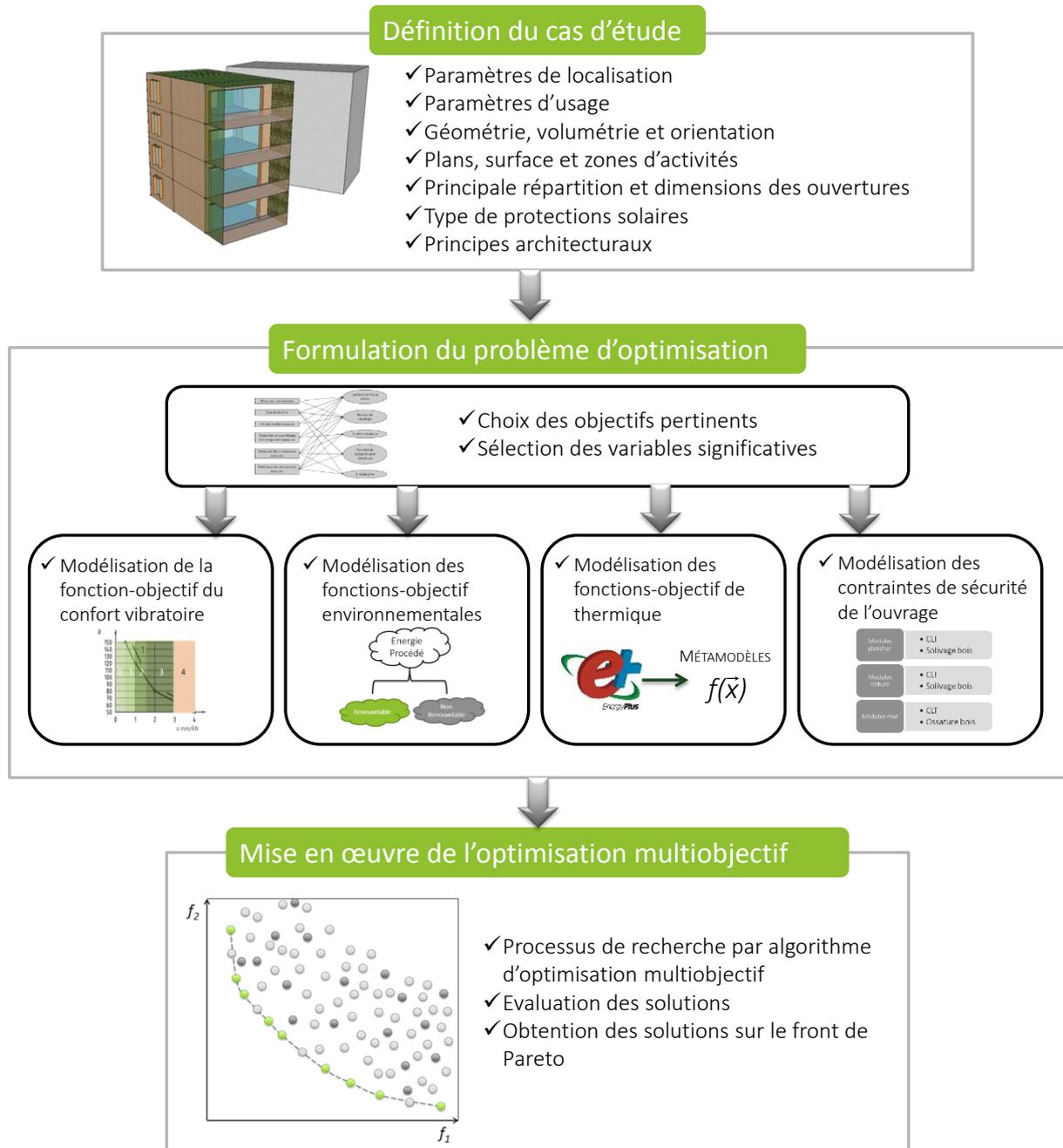


Figure 69 : Logigramme correspondant à la méthode d'optimisation multiobjectif développée

Chapitre V. Mise en œuvre de la méthode d'optimisation multiobjectif

Les cinq objectifs à optimiser – besoins de chauffage, confort thermique d'été, confort vibratoire, énergie grise et potentiel de réchauffement climatique - sont contradictoires. Par exemple, l'usage d'une chape béton ou l'augmentation d'une épaisseur d'isolant peuvent avoir un impact positif respectivement sur le confort thermique estival en augmentant l'inertie thermique du bâtiment et sur les besoins de chauffage en augmentant la résistance thermique, mais peuvent également engendrer une augmentation de l'énergie grise et du potentiel de réchauffement climatique sur le cycle de vie du bâtiment. Le but est alors d'obtenir un ensemble de compromis Pareto-optimaux parmi lesquels des choix pourront être faits par le décideur sur d'autres critères.

L'objectif de ce chapitre est alors de finaliser le choix de la méthode d'optimisation multiobjectif adéquate. Dans un premier temps le problème à optimiser est décrit et ses spécificités sont précisées. Le choix d'un algorithme d'optimisation est alors effectué et explicité.

Le système constructif bois du cas d'étude est ensuite optimisé au regard de l'ensemble des objectifs. Dans un premier temps, une variation paramétrique est réalisée sur les paramètres de l'algorithme d'optimisation. Dans un second temps, les besoins de chauffage et les degrés-heures d'inconfort des solutions obtenus à partir des métamodèles sont vérifiés sur le modèle de simulation thermique dynamique. Enfin la diversité des solutions obtenues est analysée permettant ainsi de conclure sur la pertinence de la méthode d'optimisation multiobjectif développée.

V.1. Choix d'une méthode d'optimisation adaptée au problème

V.1.a Caractéristiques du problème d'optimisation à traiter

Dans cette étude, cinq objectifs ont été choisis, différents types de variables significatives ont été identifiées puis sélectionnées et les fonctions-objectif correspondantes ont été modélisées. L'équation [V.1] permet de définir le type de problème d'optimisation multiobjectif du système constructif bois.

$$\text{Optimiser } \vec{F} = [F_{vibration}(\vec{X}), F_{Bch}(\vec{X}), F_{DH}(\vec{X}), F_{Eg}(\vec{X}), F_{Prc}(\vec{X})] \quad [V.1]$$

$$\text{sous les contraintes } \{c_j(\vec{X}) - 1 \leq 0\} \text{ et } Nvib(\vec{X}) - 3 \leq 0$$

avec $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathfrak{R}^n$, le vecteur des variables mixtes

$F_{vibration} : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ la fonction - objectif du confort vibratoire des planchers

$F_{Bch} : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ la fonction - objectif des besoins de chauffages

$F_{DH} : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ la fonction - objectif du confort thermique estival

$F_{Eg} : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ la fonction - objectif de l'énergie grise

$F_{Prc} : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ la fonction - objectif du potentiel de réchauffement climatique

$C_j : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ pour $j = 1, \dots, s$ les critères de prédimensionnement

$Nvib : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ le niveau de confort vibratoire

Les variables sont hétérogènes : certaines sont quantitatives continues telles que l'épaisseur d'une chape, l'épaisseur d'un isolant ou la profondeur d'une casquette. D'autres sont quantitatives discrètes. Par exemple, le nombre de plis du panneau CLT (nombre impair). D'autres encore sont de type qualitatif nominal. Par exemple, pour le type de plancher intermédiaire, il peut s'agir d'un « plancher à solives » ou encore d'un « plancher CLT ». Ces variables hétérogènes induisent des fonctions-objectif discontinues.

La conception multicritère du système constructif bois est alors un problème d'optimisation multiobjectif contraint et à variables hétérogènes. Pour résoudre ce problème, l'algorithme recherché doit posséder les caractéristiques suivantes :

- prise en compte de fonctions-objectif non linéaires et discontinues ;
- prise en compte de variables hétérogène (quantitatives continues ou discrètes, qualitatives nominales) ;
- optimisation simultanée de plusieurs fonctions-objectif contradictoires ;
- détermination du front de Pareto des solutions optimales ;
- capacité d'exploration globale d'un espace de solutions pouvant comporter des minimums locaux ;

- prise en compte de contraintes sur les variables et sur les fonctions.

V.1.b Choix de la méthode d'optimisation

L'optimisation du système constructif fait intervenir des fonctions-objectif non linéaires et discontinues. Les méthodes déterministes se basant sur la linéarité ou la dérivabilité des fonctions-objectif ne répondent pas aux caractéristiques de l'algorithme recherché.

Les métaheuristiques sont des méthodes approchées, d'origine combinatoire et qui ont l'avantage d'être des méthodes directes. La dérivabilité des fonctions-objectif n'est donc pas requise. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles ne garantissent pas l'obtention du minimum global (ou de l'ensemble exhaustif des meilleurs compromis au sens de Pareto dans le cas du multiobjectif). Il s'agit de choisir la métaheuristique la plus efficace pour un problème d'optimisation donné, c'est-à-dire qui permette d'obtenir des solutions optimales en un temps de calcul raisonnable. Deux types de métaheuristiques se distinguent : les méthodes de voisinage ou méthode à trajectoire et les méthodes distribuées ou méthodes à population.

Les méthodes à trajectoire sont des méthodes assimilables à de la recherche locale. Une seule solution est améliorée par itérations successives. Des astuces permettant de gérer les minimums locaux existent telles que la liste tabou de recherche tabou, la température de recuit simulé ou la notion de voisinage variable (*cf.* Annexe F). La qualité des résultats obtenus dépend alors de la solution initiale, du voisinage et de la configuration des paramètres. Pour éviter l'obtention de solutions de minimum local, la phase d'exploration de ces algorithmes peut être conséquente ce qui engendre des temps de calculs élevés. Ces solutions ne sont donc pas adaptées à des problèmes d'optimisation multiobjectif qui visent la détermination du front de Pareto des solutions optimales.

Les méthodes à population sont basées sur l'amélioration itérative d'un ensemble de solutions (population). Ces méthodes ont l'avantage d'effectuer une recherche globale. L'efficacité de ces méthodes dépend principalement de leur fonctionnement intrinsèque et de la configuration de leurs paramètres. L'un des principaux inconvénients est la difficulté de réglage des paramètres nécessaire au guidage de l'algorithme d'optimisation. Le réglage des paramètres pour l'obtention d'un bon compromis entre exploration et exploitation est certes préconisé et recherché, mais reste souvent inapplicable, car associée à des modèles numériques détaillés, elle induit des temps de calcul conséquents (Siarry 2014a). Cette catégorie de méthodes est particulièrement adaptée à l'optimisation multiobjectif avec front de Pareto (*cf.* II.4.d) et a donc été sélectionnée pour cette étude.

Le principe de fonctionnement de trois algorithmes à population a été décrit dans l'Annexe F : les algorithmes génétiques (GA), les algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis (ACO) et les algorithmes d'optimisation par essaim particulaire (PSO). La liste des paramètres de configuration de la version de base de chacun de ces algorithmes est décrite dans le Tableau 15 (Siarry 2014a). Le critère d'arrêt est ici considéré comme étant le nombre d'itérations total IT préalablement défini.

Le nombre de paramètres de configuration est au moins de huit pour GA, de six pour ACO et de six pour PSO. Pour PSO les coefficients c_1 et c_2 sont généralement pris égaux (Fontan 2011) ce qui ramène le nombre de paramètres à régler au nombre de cinq pour cet algorithme.

Tableau 15 : Paramètres de réglage des algorithmes d'optimisation à population de base suivant : algorithme génétique, optimisation par colonie de fourmis et optimisation par essaim particulaire

Algorithme génétique	Optimisation par colonie de fourmis	Optimisation par essaim particulaire
1. μ nombre d'individus	1. α influence phéromones	1. w inertie (coefficient de confiance « en soi »)
2. λ nombre d'enfants	2. β influence visibilité	2. c_1 coefficient de confiance cognitive
3. Type de population (vecteur ou binaire)	3. ρ évaporation	3. c_2 coefficient de confiance sociale
4. Méthode de croisement	4. τ_0 valeur initiale des phéromones	4. μ nombre de particules
5. Méthode de sélection	5. m nombre de fourmis	5. Le type de voisinage
6. Probabilité de croisement	6. IT nombre d'itération totale	6. IT nombre d'itération totale
7. Probabilité de mutation		
8. IT nombre d'itération totale		

En raison de leur nature (*cf.* Annexe F), les algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis sont profilés pour des problèmes d'optimisation combinatoire de type séquentiel tels que le problème du voyageur de commerce et le problème du sac à dos. Ils ne sont donc pas compatibles avec des problèmes avec variables continues et ne sont pas adaptés pour ces travaux (Elbeltagi et al. 2005).

L'utilisation des algorithmes génétiques et plus généralement des algorithmes évolutionnaires est très répandue et a démontré leur efficacité dans de nombreux domaines de l'optimisation multiobjectif (Zhou et al. 2011). Une version évoluée du GA a été utilisée par Chantrelle et al. (2011) pour l'optimisation des scénarios de réhabilitation de bâtiments. Cette version nommée NSGA-II est adaptée à l'optimisation multiobjectif de problèmes discontinus à variables mixtes (Deb et al. 2002). Des variations paramétriques ont alors été réalisées sur le nombre d'individus μ , le nombre d'itérations IT et les probabilités de mutation et de croisement. Cette étude conclut sur la robustesse de la méthode développée vis-à-vis du paramétrage de l'algorithme d'optimisation génétique. Un paramétrage par défaut est alors proposé pour l'ensemble des études réalisées.

La version de base du PSO (Eberhart and Kennedy 1995), développée pour des problèmes d'optimisation mono-objectif à variables continues a été étendue à des problèmes d'optimisation multiobjectif (Hu et al. 2003) et à variables mixtes (Kennedy and Eberhart 1997; Michaud et al. 2009). Bien qu'il soit moins utilisé que GA, le PSO a démontré à plusieurs reprises son efficacité dans des problèmes d'optimisation multiobjectif difficile (Reyes-Sierra and Coello Coello 2006; Ndiaye et al. 2009; Yang and Wang 2012).

Plusieurs travaux montrent également que les algorithmes PSO sont efficaces sur divers problèmes d'optimisation comparativement à d'autres algorithmes. Elbeltagi et al. (2005) a comparé PSO, GA, ACO et deux autres algorithmes (algorithme mimétique et algorithme des grenouilles) sur deux problèmes d'optimisation continus connus (fonction-objectif F8 (Griewank's) et F10) et sur un problème discontinu de minimisation du coût résultant de l'agencement des séquences d'un projet de construction. De nombreux calculs ont

préalablement été réalisés afin de configurer les paramètres de l'ensemble des algorithmes. Les algorithmes ont ensuite été comparés sur ces problèmes d'optimisation non convexe, continus et discontinus. En raison de son incompatibilité avec les variables continues ACO n'a pas pu être utilisée sur les deux problèmes d'optimisation continus. D'une manière générale, PSO obtient le meilleur taux de succès et les meilleures solutions et fini en deuxième position sur la durée de calcul pour le problème discontinu (derrière ACO). D'autres travaux montrent l'efficacité du PSO tels que les travaux de Yiqing et al. (2007) qui appliquent une version modifiée du PSO sur des problèmes d'optimisation non convexe, discontinu et à variable mixte et le comparent à cinq autres algorithmes dont les algorithmes génétiques. Clarke et al. (2014) comparent GA et PSO sur un problème d'optimisation de centrales géothermiques basé sur des fonctions-objectif issues de modèles numériques. Sur ce problème GA a convergé plus rapidement que le PSO, mais c'est ce dernier qui obtient la meilleure solution.

Dans une autre étude comparative de GA et PSO, Boeringer et Werner (2004) indiquent que certains problèmes sont mieux résolus par PSO et d'autres par GA. Ils soulignent néanmoins que la programmation du PSO est beaucoup plus simple et que sa rapidité de convergence est attrayante. D'après eux, « *plus l'algorithme est simple plus il est facile d'en prendre avantage* »³³. En effet, d'après le « *No Free Lunch theorem* », il n'existe pas un unique algorithme d'optimisation meilleur que les autres pour résoudre l'ensemble des problèmes d'optimisation (Wolpert and Macready 1997). Le seul moyen de trouver un algorithme d'optimisation plus efficace qu'un autre est de l'adapter au problème à optimiser. La facilité de réglage des paramètres du PSO permettant de modifier ses capacités d'exploration et d'exploitation de l'espace des solutions est un atout important.

Les algorithmes PSO possèdent alors de nombreux avantages. Ces algorithmes sont intuitifs, simples à programmer et ont un nombre de paramètres relativement faible face aux autres métaheuristiques à population. Ils permettent d'optimiser des fonctions-objectif quelconques (fonctions numériques, symboliques et algorithmes) de dimension quelconque et mettant en œuvre des variables hétérogènes. La méthode développée doit répondre à des problèmes d'optimisation pouvant varier d'un projet à l'autre (ex. : nombre de variables différentes). L'intuitivité du PSO et son faible nombre de paramètres en font un algorithme de choix, car rapidement adaptable à tout type de problème. Le PSO a donc été privilégié dans ce travail pour optimiser simultanément les cinq objectifs contradictoires choisis pour la conception d'un système constructif bois.

³³ "The simpler the algorithm, the more people can take advantage of it!" d'après Boeringer et Werner (2004)

V.2. Présentation de l'algorithme d'optimisation multiobjectif par essaim particulaire

V.2.a Description de l'algorithme de base

L'optimisation par essaim particulaire a été développée par Eberhart et Kennedy en 1995 (Eberhart and Kennedy 1995). Elle est inspirée du comportement social des vols d'oiseaux ou des bancs de poisson. Cet algorithme est alors basé sur des mécanismes de communication au sein d'une population d'agents (*essaim*), appelés *particules*. Chaque particule dispose d'une petite *mémoire* qui lui permet de mémoriser la meilleure *position* déjà rencontrée par ses voisines, celle qu'elle a déjà rencontrée et sa position actuelle. Le déplacement d'une particule est en partie influencé par son *voisinage* qui est constitué de l'ensemble des particules qui ont un lien d'information avec elle et par sa *mémoire* (Clerc 2014). Les mécanismes de communications peuvent alors être représentés selon la figure suivante qui est basée sur une topologie globale du voisinage où chaque particule informe et est informée par toutes les autres.

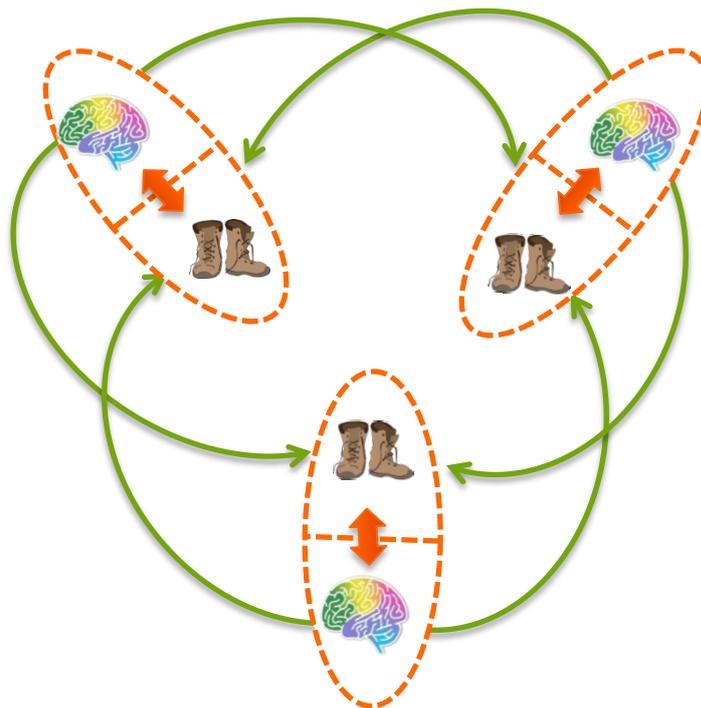


Figure 70: Mécanismes de communication entre chaque particule d'un essaim faisant intervenir les relations entre la mémoire des particules et leur position, d'après (Clerc 2014)

L'algorithme du PSO est simple et se décompose en six étapes (Ndiaye et al. 2009) :

1. Initialiser aléatoirement la position et la vitesse de chaque particule de l'essaim (μ particules) dans l'espace des solutions de dimension n .
2. Évaluer la valeur de la fonction-objectif à optimiser dans les n dimensions pour chacune des μ particules (sa position).

3. Comparer la valeur de chaque particule avec la meilleure valeur qu'elle n'ait jamais obtenue (*pbest*). Si la valeur actuelle est meilleure que *pbest* alors elle devient *pbest*.
4. Identifier la particule du voisinage avec la meilleure valeur ; si cette dernière est meilleure que la meilleure valeur déjà obtenue par une des particules de l'essaim (*gbest*), elle devient la meilleure position jamais rencontrée par le voisinage *gbest*.
5. Modifier la vitesse et la position de chaque particule selon les équations de mise à jour de la vitesse et de la position [V.2] et [V.3].
6. Retourner à l'étape 2 jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

La dimension de l'espace des solutions étant fonction du nombre n de variables de l'ensemble des fonctions-objectifs, la position et la vitesse de déplacement d'une particule sont des vecteurs à n composants. Les vecteurs vitesse $\vec{V}_i^t = (v_{i,1}^t, v_{i,2}^t, \dots, v_{i,n}^t)$ et position $\vec{X}_i^t = (x_{i,1}^t, x_{i,2}^t, \dots, x_{i,n}^t)$ sont actualisés pour chaque particule i à chaque itération t selon les équations [V.2] et [V.3] (Eberhart and Kennedy 1995). La Figure 71 permet d'illustrer ces déplacements qui sont des sommes vectorielles pondérées.

$v_{i,j}^{t+1} = w \cdot v_{i,j}^t + c_1 r_1 (p_{i,j}^t - x_{i,j}^t) + c_2 r_2 (g_j^t - x_{i,j}^t)$ <p>où :</p> <ul style="list-style-type: none"> - w représente le poids de l'inertie d'une particule ; - r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires entre 0 et 1 ; - c_1 et c_2 sont des constantes positives d'accélération ; - $p_{i,j}^t$ est la meilleure position jamais visitée par la particule i, son <i>pbest</i> ; - g_j^t est la meilleure position jamais visitée par une des voisines de la particule i, son <i>gbest</i>. 	[V.2]
$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1}$ <p>où :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $i = 1, 2, \dots, \mu$ et $j = 1, 2, \dots, n$ avec μ le nombre de particules (taille de l'essaim) et n la dimension de l'espace des solutions ; - $x_{i,j}^{t+1}$ est la position de la particule i à l'instant $t+1$; - $v_{i,j}^{t+1}$ est la vitesse de la particule i à l'instant $t+1$. 	[V.3]

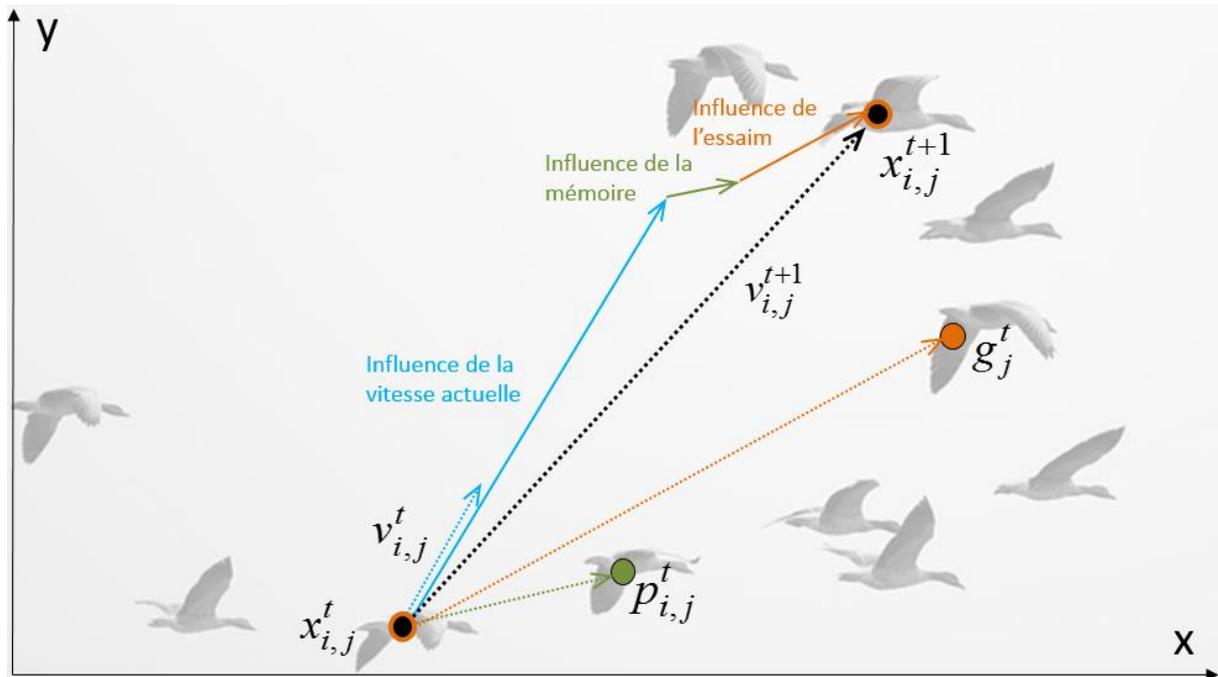


Figure 71 : Principe de déplacement d'une particule selon l'algorithme d'optimisation particulaire

V.2.b Prise en compte des variables discrètes

Kennedy et Eberhart (1997) ont introduit une version discrète binaire du PSO (DPSO) qui permet de tenir compte de variables binaires (bit, symbole ou chaînes de caractères). Ainsi ils ont étendu l'utilisation du PSO à l'optimisation de fonctions-objectif à variables continues et à variables binaires. Michaud et al. (2009) ont ensuite généralisé la version discrète binaire du PSO à une version discrète à k valeurs (Équations [V.4] et [V.5]).

$$\begin{aligned}
 x_{i,j}^{t+1} &= n_k \text{ si } \varphi_{k-1} < S(v_{i,j}^{t+1}) \\
 &= n_l \text{ si } \varphi_{l-1} < S(v_{i,j}^{t+1}) \leq \varphi_l \text{ avec } 1 < l \leq k-1 \\
 &= n_1 \text{ si } \varphi_1 \geq S(v_{i,j}^{t+1})
 \end{aligned}
 \tag{V.4}$$

où :

- $\varphi_1, \dots, \varphi_{k-1}$ sont des nombres aléatoires strictement ordonnés et uniformément distribués entre 0 et 1
- n_i est la $i^{\text{ème}}$ valeur d'une variable discrète
- k est le nombre de valeurs discrètes d'une variable

$$S(v_{i,j}^{t+1}) = \frac{1}{1 + e^{-v_{i,j}^{t+1}}}
 \tag{V.5}$$

V.2.c Intégration de la recherche multiobjectif

Plusieurs méthodes d'adaptation du PSO mono-objectif au PSO multiobjectif (MOPSO) ont été proposées et référencées par Coello Coello et Reyes-Sierra (2006). Trois points sont spécifiquement traités par les méthodes du MOPSO concernant :

- le choix des particules *meneuses* du voisinage (*gbest*) ou du souvenir (*pbest*) de chaque particule parmi l'ensemble des particules non-dominées ;
- la méthode de conservation des particules non-dominées selon Pareto trouvées durant l'ensemble du processus de recherche ;
- le maintien d'une bonne diversité dans l'essaim pour éviter la convergence vers une solution unique.

La méthode choisie permet de réaliser une optimisation multiobjectif basée sur le principe de dominance selon Pareto, de garder la simplicité initiale du PSO et de ne pas ajouter de nouveaux paramètres à configurer. Elle s'appuie sur les travaux de Alvarez-Benitez et al. (2005) qui proposent notamment une méthode basée sur la sélection aléatoire d'une meneuse parmi un ensemble de particules non-dominées. Cette méthode est simple à mettre en place et va dans le sens d'une convergence rapide. L'ajout d'une *archive* permettant de sauvegarder l'ensemble des meilleures particules de l'essaim jamais rencontrées depuis le début du processus est alors nécessaire. Le principe de l'*archive* a été initialement proposé dans les travaux de Hu et al. (2003). Le voisinage considéré ici est basé sur une topologie globale qui considère que toutes les particules de l'essaim peuvent s'informer mutuellement. Le MOPSO s'articule alors selon l'algorithme suivant :

1. Initialiser l'archive vide A contenant les meneuses.
2. Initialiser aléatoirement la position et la vitesse de chaque particule de l'essaim (μ particules) dans l'espace des solutions de dimension n .
3. Évaluer les valeurs des fonctions-objectif à optimiser dans les n dimensions pour chacune des μ particules (sa position).
4. Mettre à jour l'archive A en y ajoutant l'ensemble des particules actuelles non-dominées par d'autres particules de A et en supprimant l'ensemble des particules de l'archive qui sont dominées par de nouvelles particules (*cf.* Figure 72).
5. Comparer les valeurs des fonctions-objectif de chaque particule avec les meilleures valeurs qu'elle n'ait jamais obtenue (*pbest*). Si les valeurs actuelles constituent un meilleur compromis au sens de Pareto qui domine *pbest* alors elle devient *pbest*.
6. Sélectionner aléatoirement la *meneuse* (*gbest*) du voisinage d'une particule i parmi les particules de A qui dominent la particule i lorsque celle-ci n'est pas dans l'archive ou parmi l'ensemble des particules de A si celle-ci est dans l'archive (Figure 73).
7. Modifier la vitesse et la position de chaque particule selon les équations de mise à jour de la vitesse et de la position [V.3] et [V.2].
8. Retourner à l'étape 3 jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

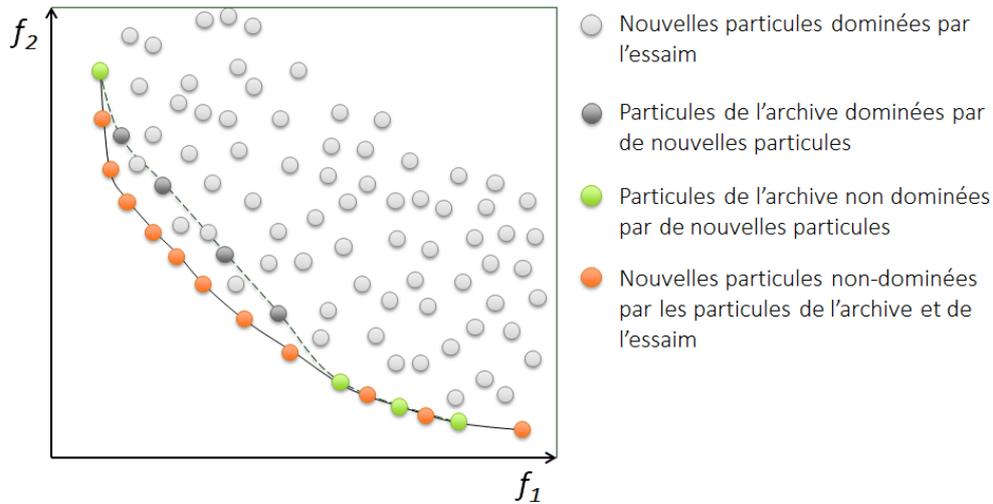


Figure 72 : Illustration de l'évolution d'une archive A au cours d'une itération

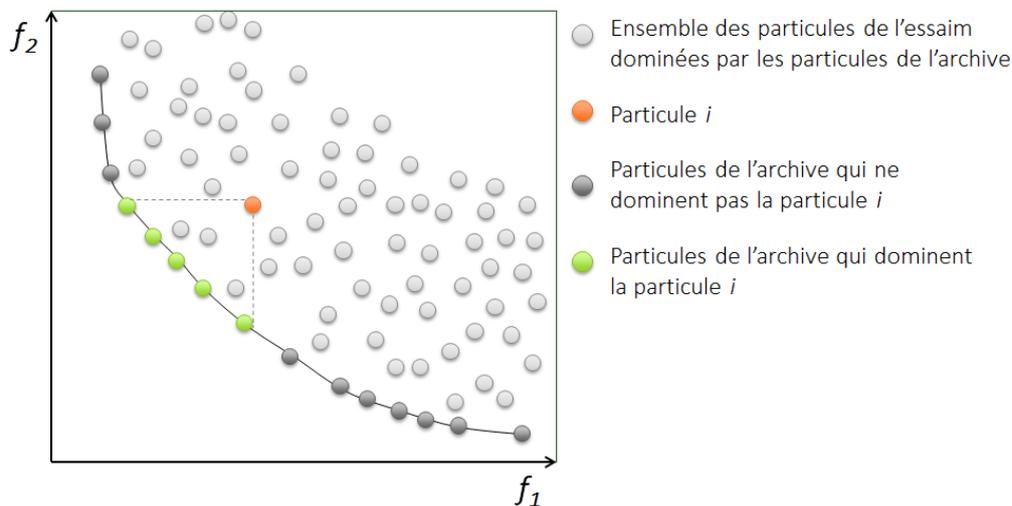


Figure 73 : Illustration de l'ensemble des particules de l'archive qui domine la particule i et susceptible de prendre la position de g_{best}

V.2.d Intégration des contraintes sur un ensemble de variables

L'algorithme d'optimisation MOPSO tel que décrit précédemment ne permet pas de faire la distinction entre les particules i respectant les contraintes de celles qui ne les respectent pas. Or le problème considéré est constitué de contraintes formalisées selon l'équation [V.1]. Il s'agit donc d'un problème d'optimisation multiobjectif contraint. La méthode doit donc prendre en compte ces contraintes pour que l'ensemble des particules non-dominées soit des solutions admissibles au regard des contraintes considérées.

En optimisation multiobjectif sous contrainte une fonction de violation des contraintes peut être introduite pour caractériser l'admissibilité d'un ensemble de variables \vec{X} donné (Rivallain 2013). Pour le problème de l'optimisation de système constructif bois, cette fonction peut prendre la forme décrite dans l'équation [V.6].

$$\Omega(\vec{X}) = \sum_{j=1}^{s+1} W_j(\vec{X}) \text{ avec} \quad [V.6]$$

$$\forall j[1, \dots, s+1], W_j(\vec{X}) = \begin{cases} 1 \text{ si } C_j(\vec{X}) - 1 > 0 \text{ ou } Nvib = 4 \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

où :

- $\Omega: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ est la fonction de violation des contraintes ;
- $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathfrak{R}^n$ est le vecteur des variables mixtes ;
- $C_j: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ pour $j = 1, \dots, s$ sont les critères de prédimensionnement ;
- $Nvib: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ est le niveau de confort vibratoire

Si la fonction $\Omega(\vec{X})$ vaut 0 cela signifie que la solution correspondant au vecteur \vec{X} respecte l'ensemble des contraintes mécaniques. Dans le cas contraire la valeur de $\Omega(\vec{X})$ est égale au nombre de contraintes non respectées.

Une multitude de méthodes provenant de catégories différentes existent telles que les méthodes de pénalisation, les méthodes fondées sur la supériorité des individus réalisables, sur la recherche ou préservation de solutions réalisables ou encore sur l'ajout de contraintes-objectif (Verbeeck 2007; Rivallain 2013; Sana Ben Hamida 2014).

Les méthodes de pénalisation sont les plus couramment employées. Elles consistent à pénaliser les solutions qui violent les contraintes posées en ajoutant aux fonctions-objectif une fonction de pénalité $U(\vec{X})$ selon l'équation [V.7].

$$\vec{F} = [F_1(\vec{X}), F_2(\vec{X}), \dots, F_m(\vec{X})] + U(\vec{X}) \quad [V.7]$$

$$\text{avec } U(\vec{X}) \begin{cases} = 0 \text{ si } \Omega(\vec{X}) = 0 \\ > 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

Plusieurs approches permettent de définir la fonction de pénalité. L'approche la plus simple qui n'induit pas d'opérateur supplémentaire et qui se programme facilement est la méthode de la « peine de mort ». Cette méthode consiste simplement à rejeter les solutions irréalisables en attribuant une valeur infinie (ou réhibitoire vis-à-vis des fonctions-objectif) à la fonction de pénalité. Les autres méthodes de pénalité nécessitent l'attribution d'une fonction statique, dynamique ou adaptative à la fonction de pénalité et l'ajout puis le réglage de paramètres additionnels souvent laborieux et empiriques (Rivallain 2013).

Les méthodes fondées sur la supériorité des individus reposent sur la considération que toute solution qui respecte les contraintes est meilleure qu'une solution qui ne les respecterait pas. La plupart de ces approches fonctionnent également à partir d'une fonction de pénalité définie

selon la supériorité des individus réalisables et nécessitent alors la configuration de paramètres additionnels. Une autre approche fondée sur la supériorité des individus et spécifiquement adaptée aux algorithmes génétiques intervient durant la phase de sélection en donnant la priorité aux solutions réalisables (Deb 2000).

La recherche de solutions réalisables consiste à orienter les solutions vers des domaines réalisables. Par exemple, la réparation des individus vise souvent à rechercher par itération successive plus ou moins aléatoirement une solution de remplacement à toute solution irréalisable. Dans un espace fortement contraint et selon la taille de la population, cette approche peut s'avérer longue. Une autre méthode basée sur la recherche de solutions réalisables utilise une mémoire comportementale (Schoenauer and Xanthakis 1993). Dans un premier temps cette méthode va faire évoluer la population pour l'obtention d'un espace de solutions réalisables en traitant successivement chacune des contraintes. Dans un second temps, la recherche est réalisée pour l'obtention de solutions optimales en appliquant la pénalité de « peine de mort ».

Enfin une dernière catégorie consiste à ajouter une fonction-objectif au problème d'optimisation. Cette fonction peut par exemple correspondre à la fonction de violation des contraintes définie à l'équation [V.6]. L'ajout d'une telle « contrainte-objectif » peut induire des difficultés de convergence (Verbeeck 2007) et induit le risque d'obtenir une proportion importante de solutions irréalisables. Toutefois cette méthode à l'avantage de ne pas nécessiter de changement dans l'algorithme et de diversifier la recherche.

Bien qu'étant la plus simple, la méthode de la « peine de mort » est réputée de performance faible. Elle dépend notamment du rapport entre l'espace des solutions faisable et des solutions non faisables ainsi que de l'initialisation du processus (Sana Ben Hamida 2014). Il est donc important lors de la formalisation du problème et notamment de la définition des variables, de faire en sorte que l'espace des particules admissibles représente une large proportion de l'espace de recherche. Toutefois l'application d'une pénalité de type « peine de mort » n'a pas le même impact sur la diversification de la recherche dans GA que dans PSO. En effet dans GA, l'application d'une pénalisation de type peine de mort va tendre à éliminer les individus irréalisables durant la sélection de λ parents parmi les μ individus puisque leurs performances seront infiniment pénalisées par rapport aux autres individus. Ces solutions irréalisables éliminées ne serviront donc pas à la diversification de la recherche. Dans le cas du PSO les particules fortement pénalisées ne seront pas retenues en tant que meneuses *pbest* et *gbest*. Par contre, les particules irréalisables servent tout de même à la diversification de la recherche puisque leurs position et vitesse actuelles sont utilisées pour la détermination de nouvelles particules selon les équations [V.3]et [V.2].

Pour le PSO, Hu et Eberhart (2002) proposent une méthode basée sur la recherche de solutions réalisables : les particules sont alors initialisées de façon itérative jusqu'à ce qu'elles respectent l'ensemble des contraintes. Ensuite, durant les étapes de calcul des meneuses *pbest* et *gbest*, seules des solutions réalisables sont retenues. Ce dernier point revient à appliquer une pénalité de type « peine de mort ». Hu et Eberhart (2002) ont alors comparé et testé cette méthode sur un ensemble de onze fonctions tests. Les conclusions montrent que cette méthode est simple

et efficace, mais que les paramètres doivent être ajustés et qu'une taille d'essaim trop importante peut induire un temps d'initialisation conséquent.

Afin de ne pas introduire de modifications majeures dans le fonctionnement de l'algorithme MOPSO et de ne pas ajouter de paramètres supplémentaires, la méthode retenue dans ce travail est la méthode de la pénalité de type « peine de mort » qui ne conserve aucune solution irréalisable ni dans la mémoire des particules ni dans l'archive de l'essaim.

V.2.e Description des paramètres du MOPSO

Les paramètres de l'algorithme du PSO permettent de rechercher un bon compromis entre l'exploration et l'exploitation de l'espace. Une exploration trop importante se rapproche d'une recherche aléatoire. Elle permet d'obtenir une diversité de solutions importante, mais ne permet donc pas de converger efficacement vers des optimums globaux. Une exploitation trop importante permet au contraire de converger rapidement au risque d'obtenir peu de diversité et de tomber dans un optimum local. Les paramètres de l'algorithme MOPSO choisis sont alors les suivants :

- ***IT* nombre d'itération totale** : Il s'agit de trouver le nombre d'itérations minimum et suffisant à l'intensification de la recherche ; c'est-à-dire le nombre auquel une itération supplémentaire n'apporte plus grand-chose au processus d'optimisation. Le nombre d'itérations dépend fortement des autres paramètres,
- **μ nombre de particules** : un grand nombre de particules va permettre d'explorer l'espace en diversifiant les solutions et en évitant les minimums locaux. Un nombre trop important va néanmoins alourdir le temps de calcul,
- **w inertie (coefficient de confiance « en soi »)** : l'inertie permet de contrôler l'impact de la vitesse actuelle d'une particule sur le calcul de sa vitesse à l'itération suivante. Une inertie importante facilite une exploration globale (recherche de nouveaux espaces) alors qu'une inertie faible facilite l'exploration locale en tournant autour de la position actuelle de la particule (Eberhart and Shi 1998). Ce coefficient est généralement inférieur à 1 pour ne pas favoriser des mouvements trop rapides (Fontan 2011). Clerc (2014) indique qu'une valeur de l'inertie est typiquement prise entre 0,7 et 0,9. Une valeur classiquement utilisée est $w=0,729$ (Eberhart and Kennedy 1995; Hu et al. 2003),
- **c_1 coefficient de confiance cognitive** : Ce coefficient permet d'orienter la particule selon sa meilleure position $pbest$,
- **c_2 coefficient de confiance sociale** : Ce coefficient permet d'orienter la particule selon les meilleures positions du voisinage $gbest$. Généralement les coefficients c_1 et c_2 sont pris égaux et sont supérieurs à 1 (Fontan 2011).
- **Le type de voisinage** : Plusieurs topologies de voisinages existent. Les deux topologies les plus fréquemment employées sont la topologie globale, où chaque particule informe et est informée par l'ensemble des particules de l'essaim et la topologie locale en anneau, où une particule n'a que deux voisins avec lesquelles elle interagit (Ndiaye et al. 2009). La topologie globale converge plus rapidement et est susceptible de tomber sur un minimum local alors que la topologie locale en anneau explore l'espace et est moins vulnérable à l'attraction d'un minimum local.

Clerc (1999) définit un paramètre de constriction φ permettant de relier les coefficients c_1 , c_2 et w . L'équation [V.2] est alors modifiée selon l'équation [V.8].

$$v_{i,j}^{t+1} = K \times (v_{i,j}^t + c_1 r_1 (p_{i,j}^t - x_{i,j}^t) + c_2 r_2 (g_j^t - x_{i,j}^t)) \quad [V.8]$$

avec $K = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4 \times \varphi}}$ où $\varphi = c_1 + c_2$, $\varphi > 4$

Dans l'étude de cas les paramètres sont déterminés de façon suivante :

- La méthode multiobjectif développée provient des travaux de Alvarez-Benitez et al. (2005) qui considèrent une topologie de voisinage globale. Le type de voisinage est donc fixé ainsi dans le reste de ces travaux.
- Des variations paramétriques sont réalisées pour déterminer le nombre de particules μ et le nombre d'itérations IT avec les paramètres w , c_1 et c_2 respectivement fixés à 0,729, 1,495 et 1,495 (Eberhart and Kennedy 1995) ce qui correspond à un paramètre de constriction $\varphi = 4,1$ avec $c_1=c_2$.
- Des variations paramétriques sont également réalisées sur le paramètre de constriction φ .

V.3. Optimisation du cas d'étude

V.3.a Sensibilité du front de Pareto aux paramètres du MOPSO

Dans un premier temps, une variation paramétrique relative au nombre d'itérations a été réalisée pour des essais constitués de 10, 50, 100 et 500 particules. Plus le nombre de particules de l'essaim est élevé et plus le nombre de solutions obtenues est important. Le nombre de solutions ne cesse de croître au cours des itérations successives (Figure 74). Avec 10, 50 et 100 particules dans l'essaim le nombre de solutions croît de façon linéaire. Avec 500 particules, le nombre de solutions obtenues n'a pas convergé au bout de 1000 itérations, mais commence à se stabiliser.

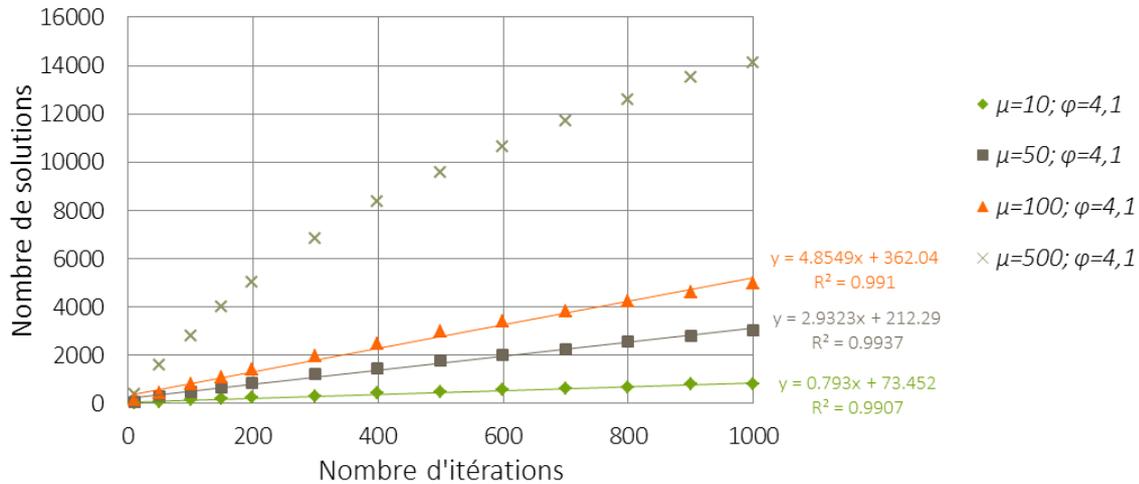


Figure 74 : Évolution du nombre de solutions en fonction du nombre d'itérations pour des essais constitués de 10, 50, 100 et 500 particules

La Figure 75 présente l'évolution du nombre de solutions en fonction du nombre de points de l'espace des solutions visité au cours des 1000 itérations. Le nombre de solutions obtenues semble corrélé avec le nombre de points de l'espace des solutions visité.

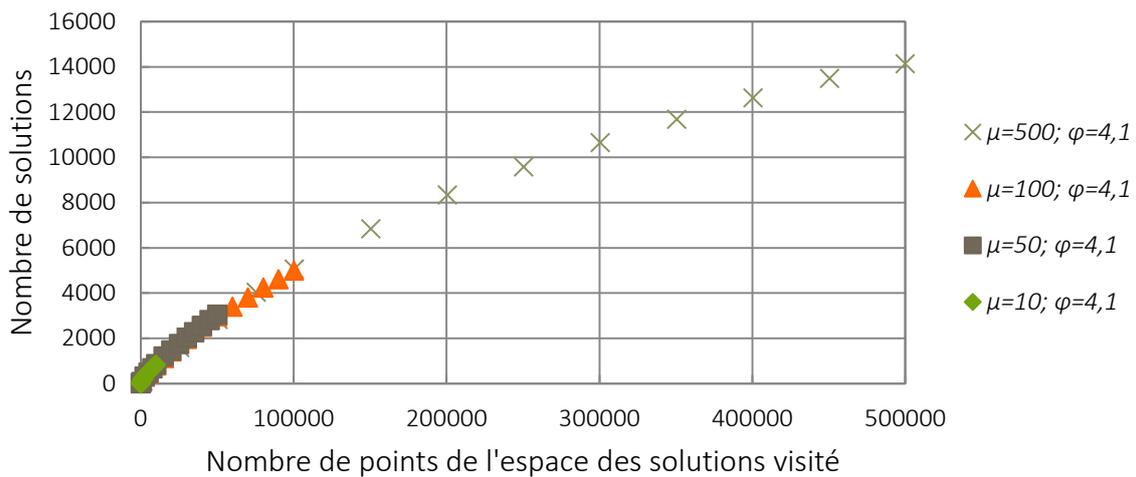


Figure 75 : Évolution du nombre de solutions en fonction du nombre de points de l'espace des solutions visité pour des essais constitués de 10, 50, 100 et 500 particules

Dans la Figure 76, les solutions du front de Pareto sont représentées selon les résultats des fonctions-objectif prises deux à deux avec l'inconfort thermique estival en abscisse et les autres fonctions en ordonnées pour 1000 itérations et pour 10, 50, 100 et 500 particules. L'augmentation du nombre de particules dans l'essaim permet de diversifier la recherche pour un même nombre d'itérations en explorant plus de zones de l'espace. De plus, de nouveaux groupes de solutions se distinguent.

Les Figure 77 et Figure 78 représentent les solutions du front de Pareto respectivement pour 500 et 10 particules et pour 10, 100, 500 et 1000 itérations. L'augmentation du nombre d'itérations permet d'intensifier la recherche en explorant des zones particulièrement intéressantes qui constituent des extrema. Ainsi avec 500 particules, au bout de 500 itérations,

des groupes de solutions distincts commencent à se distinguer. Le nombre de particules dans l'essaim influence la répartition des particules dans l'espace des solutions dès les premières itérations. Il s'agit donc d'ajuster le nombre d'itérations et de particules dans l'essaim pour obtenir un nombre et une diversité de solutions satisfaisants.

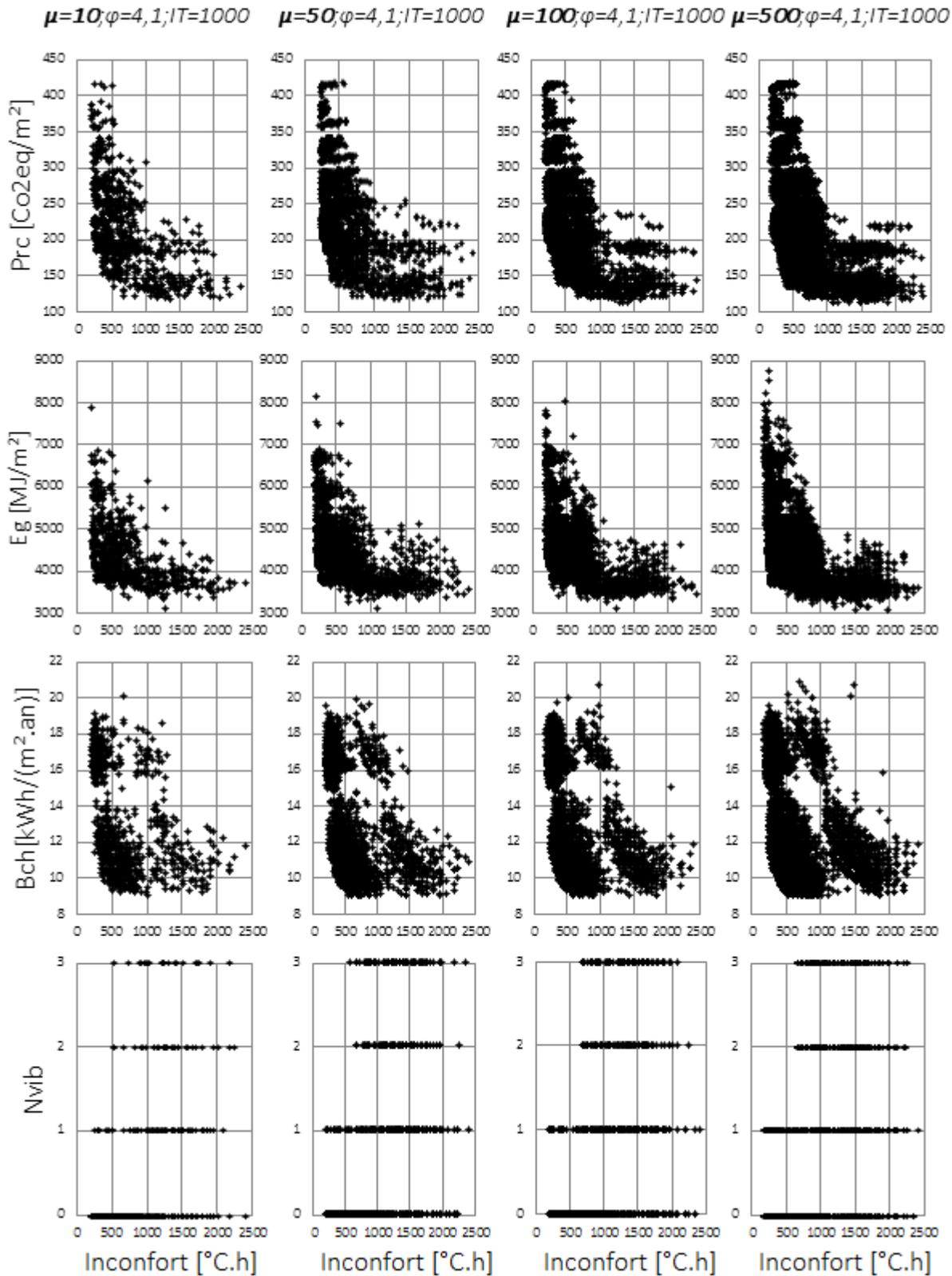


Figure 76 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux avec l'inconfort en abscisse et les autres fonctions-objectif en ordonné pour 1000 itérations et pour 10, 50, 100 et 500 particules

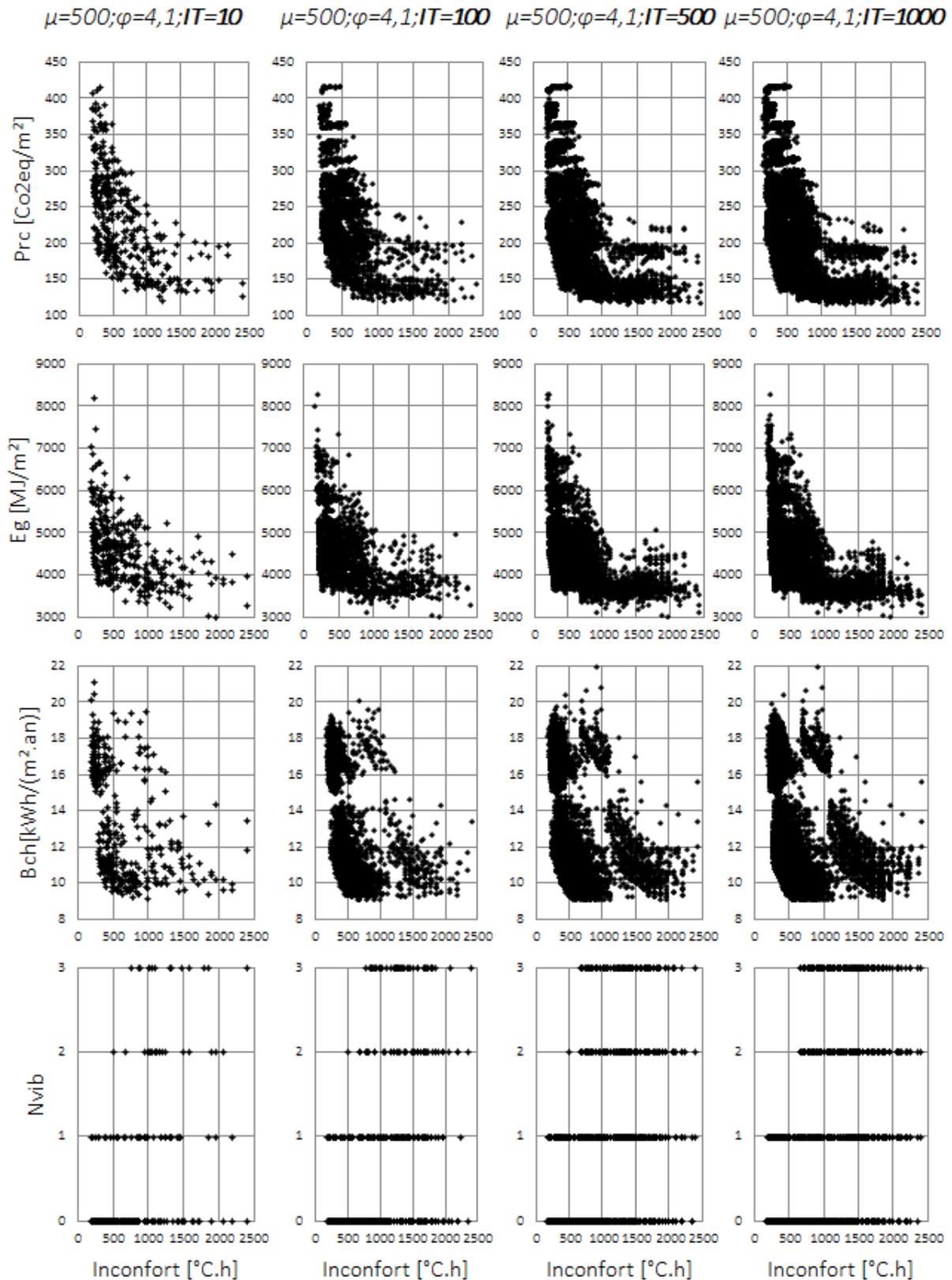


Figure 77 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux avec l'inconfort en abscisse et les autres fonctions-objectif en ordonné pour 500 particules et pour 10, 100, 500 et 1000 itérations

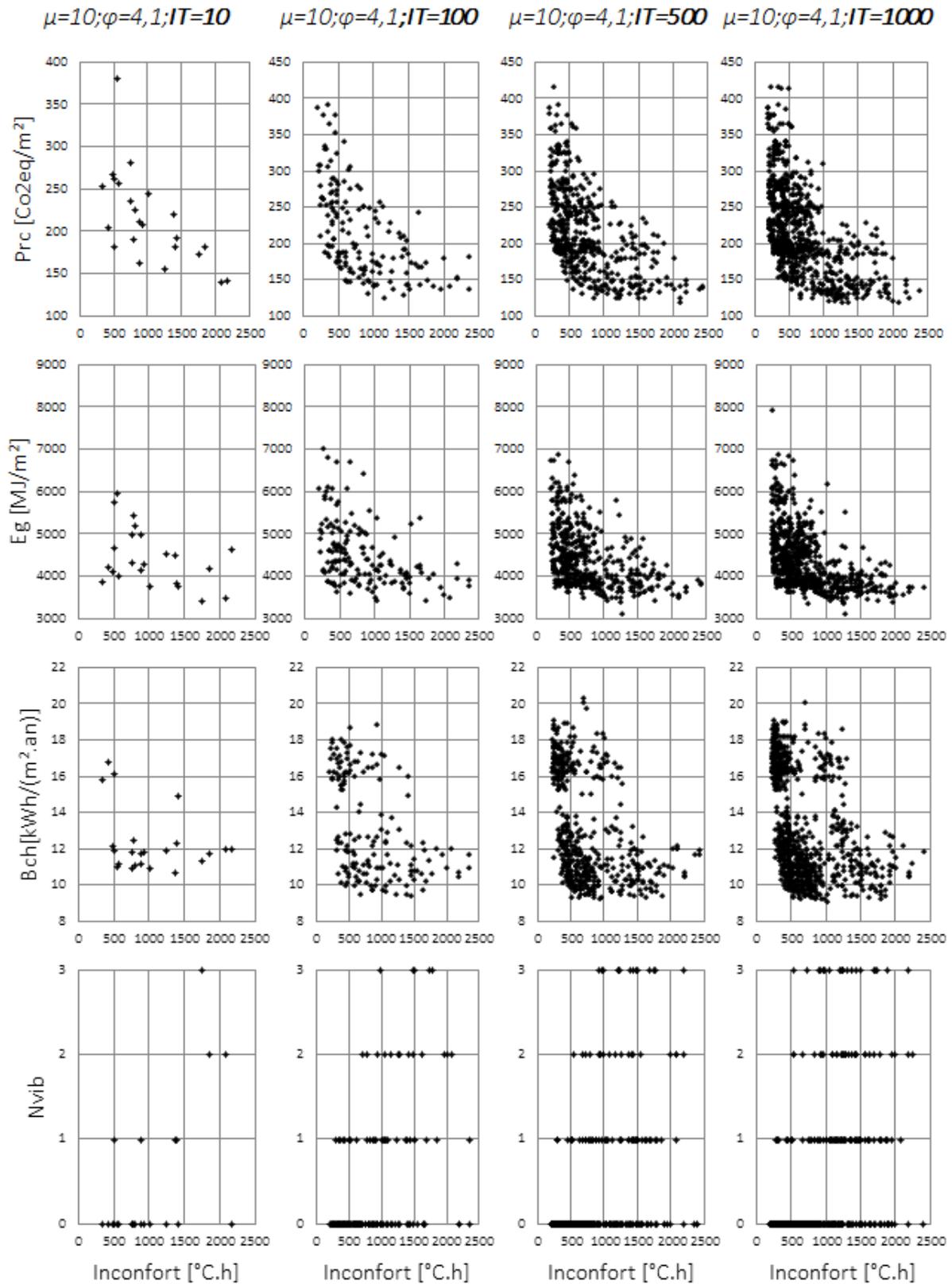


Figure 78 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux avec l'inconfort en abscisse et les autres fonctions-objectif en ordonné pour 10 particules et pour 10, 100, 500 et 1000 itérations

Des variations paramétriques ont également été réalisées avec le paramètre de constriction φ . La diminution du paramètre de constriction avec $\varphi = 4,0$ ($w = 1$ $c_1 = c_2 = 2$) augmente nettement le nombre de solutions obtenues avec un essaim de 10 particules avec 1356 solutions contre 825 solutions avec $\varphi = 4,1$. Par contre pour $\varphi = 4,05$ et $\varphi = 4,2$ il n'y a pas de nette différence quant au nombre de solutions obtenues Figure 79.

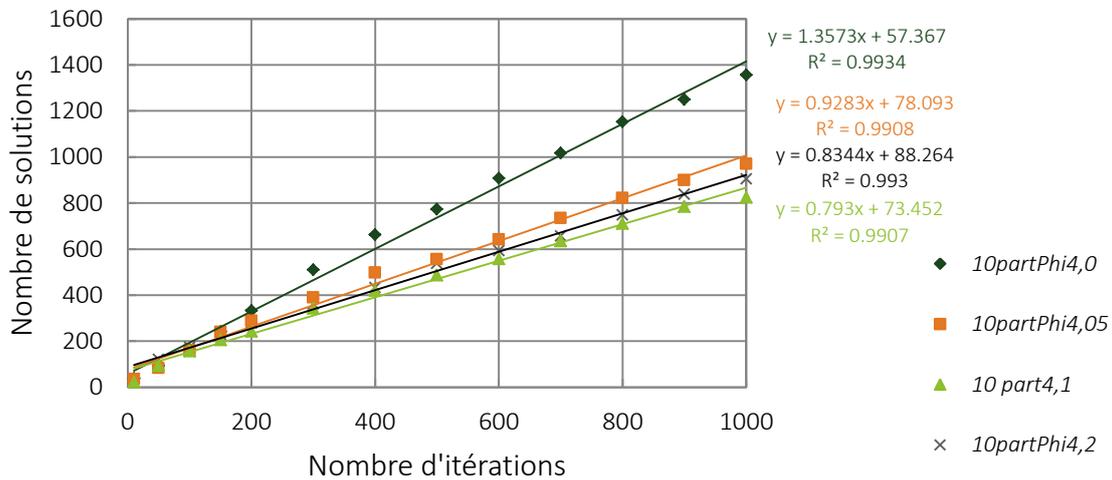


Figure 79 : Évolution du nombre de solutions en fonction du nombre d'itérations pour des essais constitués de 10 particules avec des paramètres de constriction $\varphi=(4,0 ; 4,05 ; 4,1 ; 4,2)$

Alors que le nombre de solutions augmente nettement avec $\varphi=4,0$ la diversité des solutions est quant à elle réduite (Figure 80). Par contre avec 500 particules et 1000 itérations le nombre et la diversité de solutions obtenues ne varie pas significativement selon le paramètre de constriction. Néanmoins, le temps de calcul passe de 7 h pour $\varphi=4,1$ à 22h pour $\varphi=4$.

Il apparaît donc que le choix d'un nombre élevé de particules permette de maintenir une stabilité du front, quel que soit le paramètre de constriction choisi.

Avec un paramètre de constriction $\varphi=4,1$ et 500 particules la diversité des solutions après 500 itérations se confond avec celle obtenue au bout de 1000 itérations. Néanmoins, 9 574 solutions ont été obtenues avec 500 itérations contre 14 136 avec 1000 itérations. Dans la suite de cette étude un paramètre de constriction $\varphi=4,1$; 500 particules et 1000 itérations ont donc été conservées pour l'optimisation.

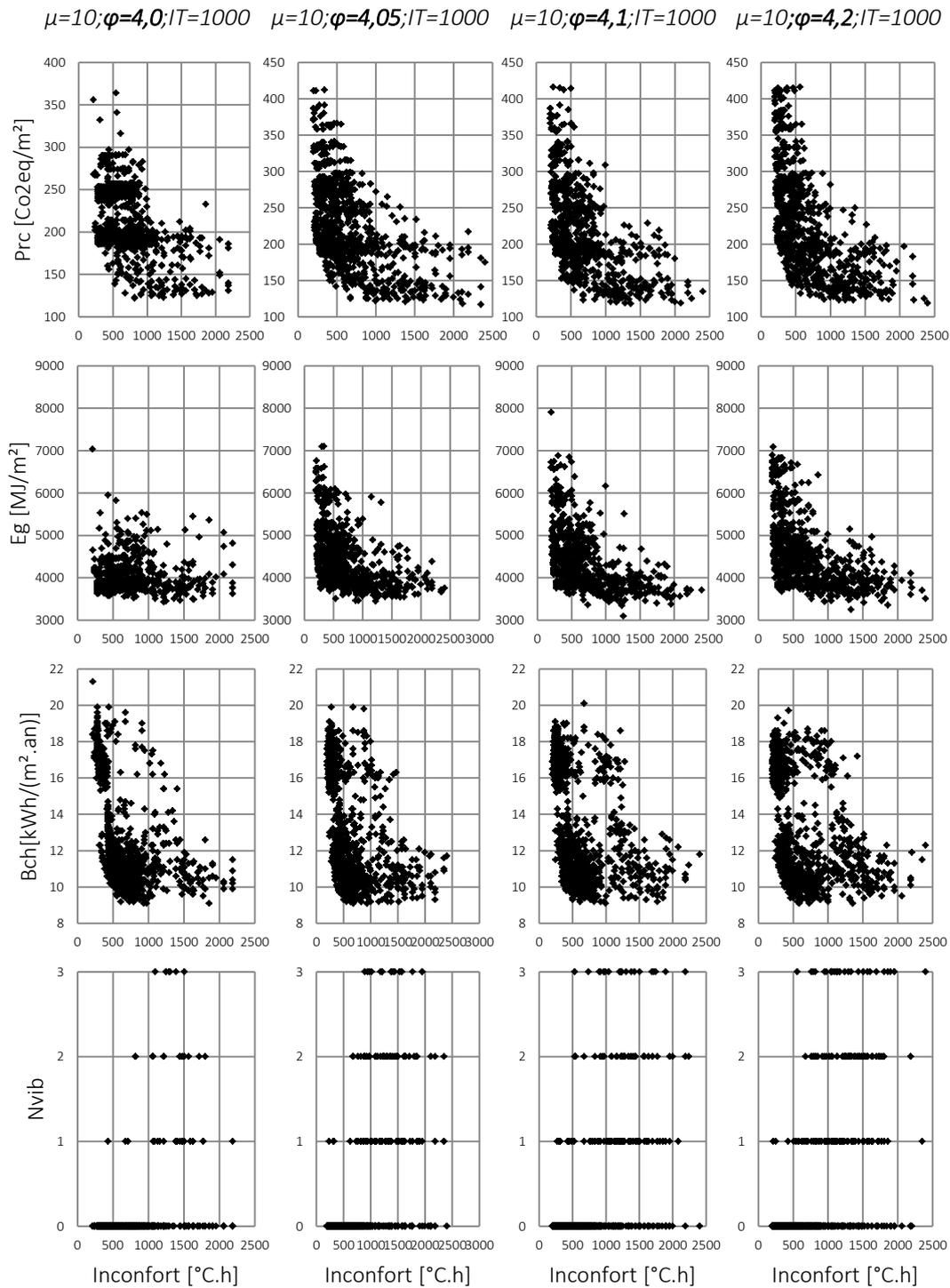


Figure 80 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux avec l'inconfort en abscisse et les autres fonctions-objectif en ordonnée pour 10 particules, 1000 itérations et pour $\varphi=(4,0; 4,05; 4,1; 4,2)$

V.3.b Validation des métamodèles sur les solutions optimales

L'optimisation simultanée de la minimisation des *besoins de chauffage*, des *degrés-heure d'inconfort thermique*, du *niveau d'inconfort vibratoire des planchers*, du *potentiel de réchauffement climatique* et de *l'énergie grise* a été effectuée. Le front de Pareto obtenu est constitué de 14 123 solutions.

Dans un premier temps, il s'agit de valider les résultats obtenus vis-à-vis des erreurs de prédiction des métamodèles. Les besoins de chauffage et les degrés-heure d'inconfort estival de l'ensemble des solutions obtenues ont donc été réévalués avec le modèle numérique EnergyPlus. Les erreurs RMSE et MAE des métamodèles (équations [IV.24] et [IV.25] page 145) obtenues à l'issue de leur construction (base de validation) ainsi que celles calculées sur l'ensemble des solutions optimales sont présentées dans le Tableau 16. Chacune des solutions a également été représentée sur les graphes de la Figure 81 avec les résultats issus du modèle EnergyPlus sur l'axe des abscisses et des métamodèles correspondant sur l'axe des ordonnées pour les besoins de chauffage (gauche) et les degrés-heures d'inconfort estival (droite).

Tableau 16 : Erreur RMSE et MAE du métamodèle sur l'échantillon de validation (construction) et sur les solutions du front de Pareto (optimisation).

	CONSTRUCTION		OPTIMISATION	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
Besoins de chauffage [kWh/(m ² .an)]	0,05	0,2	0,7	2,5
Degrés-heures d'inconfort [°C.h/an]	10	77	88	354

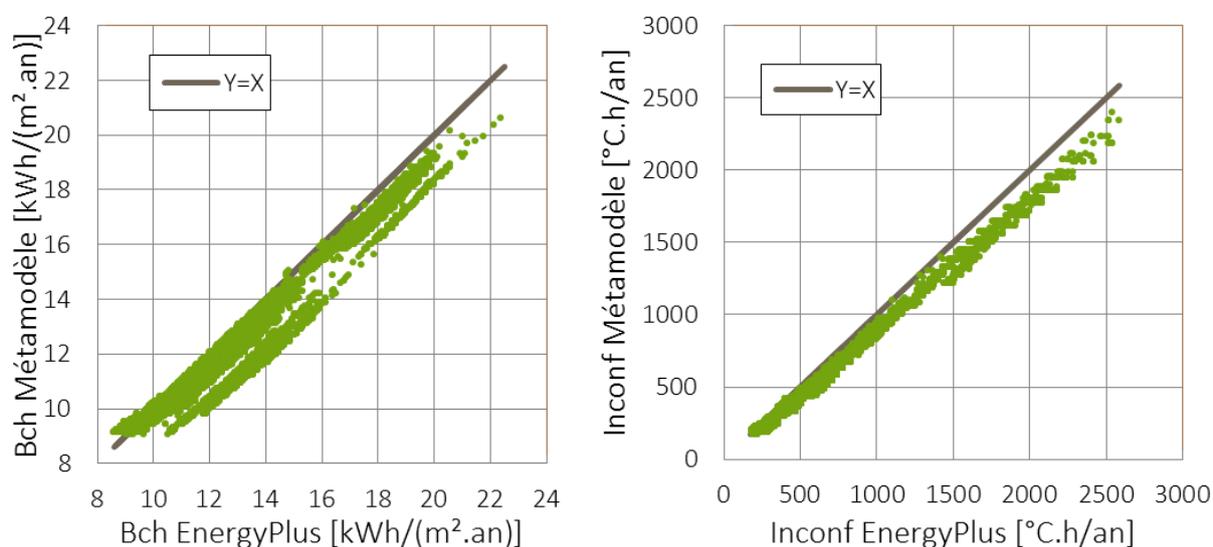


Figure 81 : Comparaison des résultats obtenus avec les métamodèles et le modèle numérique EnergyPlus pour les besoins de chauffage (gauche) et les degrés-heure d'inconfort (droite)

L'erreur d'estimation des métamodèles sur l'échantillon de validation est plus importante que lors de la construction du métamodèle. Deux sources d'erreurs peuvent expliquer ces écarts :

- L'erreur des métamodèles a été calculée sur l'intégralité des 12 variables utilisées pour construire les deux métamodèles. Lors de la construction des métamodèles, les variables considérées comme non influentes pour les besoins de chauffage et les degrés-heures d'inconfort ont été fixées pour leur construction respective (cf. section III.5.b.). Ainsi les variables non influentes pour les besoins de chauffage ont été fixées pour la construction du métamodèle des besoins de chauffage. Néanmoins, certaines de ces variables qui influencent les degrés-heures d'inconfort ont été retenues pour la construction du métamodèle des degrés-heures d'inconfort. Les variables d'optimisation fixées et négligées pour la construction des métamodèles induisent des erreurs de prédiction supplémentaires.
- L'algorithme d'optimisation vise l'obtention de solutions de compromis Pareto-optimaux. Les besoins de chauffage et les degrés-heure d'inconfort sont à minimiser. Ainsi l'optimisation tend à trouver les solutions qui minimisent ces objectifs et donc qui maximisent les erreurs RMSE et MAE dans ce sens. Cela explique également que les résultats des solutions obtenues avec les métamodèles se situent généralement en dessous des résultats du modèle numérique EnergyPlus.

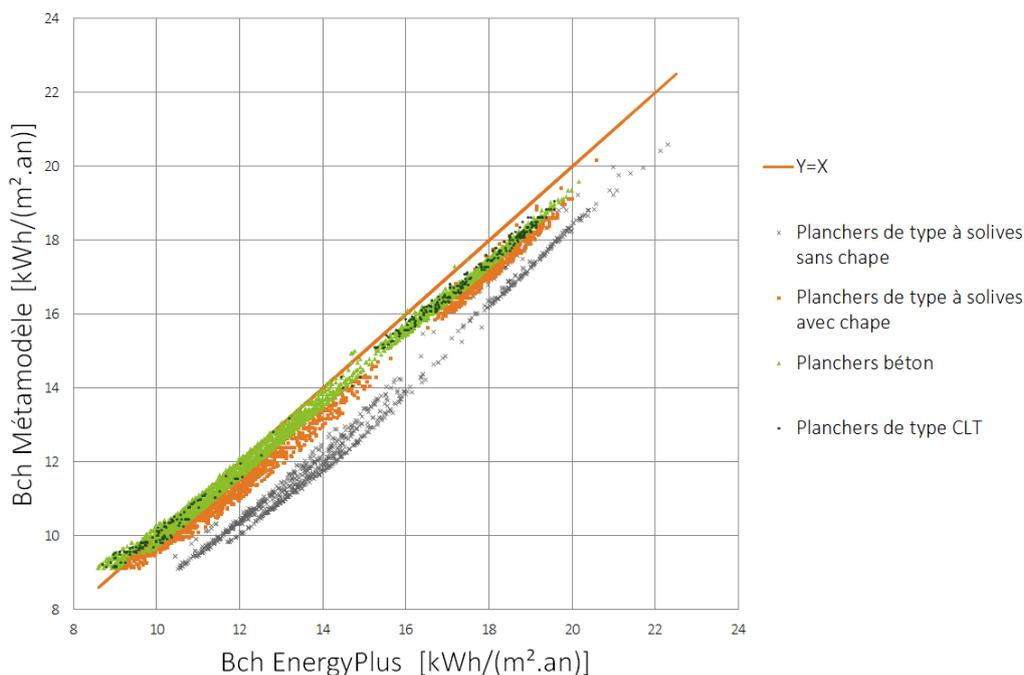


Figure 82 : Distinction des types de planchers pour la comparaison des résultats du métamodèle des besoins de chauffage avec EnergyPlus

La Figure 82 représente à nouveau les résultats des besoins de chauffage issus du modèle EnergyPlus sur l'axe des abscisses et du métamodèle sur l'axe des ordonnées pour les besoins de chauffage. Des groupes correspondants à différents types de plancher intermédiaires ont été distingués. Il apparaît clairement que l'erreur de prédiction du métamodèle provient du type de plancher. Durant l'analyse de sensibilité, les différents types de planchers ont été considérés en faisant varier l'épaisseur d'une chape béton et l'épaisseur d'un panneau de bois

d'une valeur nulle à une valeur pouvant correspondre à un plancher béton ou un plancher CLT avec éventuellement une chape. L'épaisseur de la chape et du panneau bois n'ont pas été identifiés et retenus comme étant des variables significatives des besoins de chauffage, mais uniquement des degrés-heures d'inconfort. Le métamodèle des besoins de chauffage a donc été réalisé en fixant ces deux éléments à leur valeur nominale.

Deux nouveaux métamodèles ont alors été construits pour les besoins de chauffage et les degrés-heures d'inconfort estival à partir des 12 variables influentes. Les variables négligeables pour les besoins de chauffage, mais influentes pour les degrés-heures d'inconfort et inversement ont donc été considérées pour la construction des deux métamodèles. Comme précédemment le métamodèle des besoins de chauffage a été construit à partir d'un échantillon de 5000 évaluations et celui des degrés-heures d'inconfort à partir d'un échantillon de 10 000 évaluations. Une nouvelle optimisation a alors été réalisée à partir de ces nouveaux métamodèles et 20 223 solutions ont été obtenues. Les besoins de chauffage et les degrés-heure d'inconfort estival de 2 000 solutions tirées aléatoirement ont ensuite été réévalués avec le modèle numérique EnergyPlus. Les erreurs RMSE et MAE des métamodèles obtenues à l'issue de leur construction et sur les 2 000 solutions optimales sont présentées dans le Tableau 17. Chacune des solutions a également été représentée sur les graphes de la Figure 81 avec les résultats issus du modèle EnergyPlus sur l'axe des abscisses et des métamodèles correspondant sur l'axe des ordonnées pour les besoins de chauffage (gauche) et les degrés-heures d'inconfort estival (droite).

Tableau 17 : Erreur RMSE et MAE des nouveaux métamodèles sur l'échantillon de validation (construction) et sur les solutions du front de Pareto (optimisation).

	CONSTRUCTION		OPTIMISATION	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
Besoins de chauffage [kWh/(m ² .an)]	0,11	0,56	0,2	0,74
Degrés-heures d'inconfort [°C.h/an]	25	570	53	513

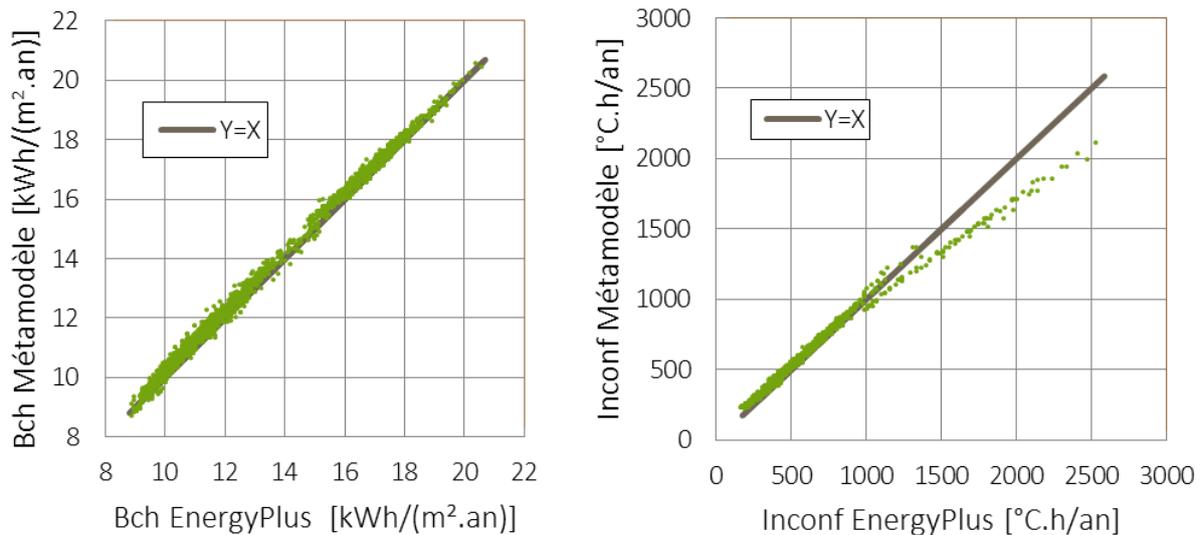


Figure 83 : Comparaison des résultats obtenus avec les nouveaux métamodèles (12 variables) et le modèle numérique EnergyPlus pour les besoins de chauffage (gauche) et les degrés-heure d'inconfort (droite)

Bien que l'erreur de construction sur l'échantillon de validation soit plus importante avec les métamodèles construits à partir de 12 variables (au lieu de 7 variables pour les besoins de chauffage et 8 variables pour les degrés-heures d'inconfort), les erreurs obtenues à l'issue de l'optimisation sont quant à elles moins importantes. Les erreurs MAE des deux métamodèles obtenues sur les 2000 solutions optimales sont proches des erreurs prédites lors de leur construction sur l'échantillon de validation. Les erreurs RMSE sont quant à elles deux fois plus importantes avec 0,2 kWh/(m².an) pour les besoins de chauffage et 53 °C.h/an pour les degrés-heures d'inconfort thermique.

L'erreur d'estimation des degrés-heures d'inconfort s'accroît lorsque les degrés-heures d'inconfort augmentent au-delà de 1 000 °C.h. En contrepartie plus les degrés-heures d'inconfort d'une solution seront élevés moins cette solution aura de chance d'être choisie.

Afin d'étudier la taille de l'échantillon d'apprentissage (nombre d'évaluations du modèle EnergyPlus) nécessaire pour la construction de métamodèles précis, les erreurs RMSE et MAE ont été calculées sur la base de validation et sur les 2 000 solutions optimales pour des métamodèles construits avec 5000, 2600, 1400, 600 et 200 évaluations pour les besoins de chauffage et avec 10000, 9200, 5200, 1800, 600 et 200 évaluations pour les degrés-heures d'inconfort.

L'évolution des erreurs de construction RMSE et MAE en fonction de la taille d'échantillon d'apprentissage sont représentées sur les Figure 84 et Figure 85 pour les besoins de chauffage et sur les Figure 86 et Figure 87 pour les degrés-heures d'inconfort. Les métamodèles étudiés sont symbolisés dans ces quatre figures.

Les pics observables dans les tracés des erreurs MAE (Figure 85 et Figure 87) résultent soit d'un changement d'ordre du métamodèle soit d'un point de la base de validation qui est éloigné des points considérés dans la base d'apprentissage utilisée pour la construction du métamodèle.

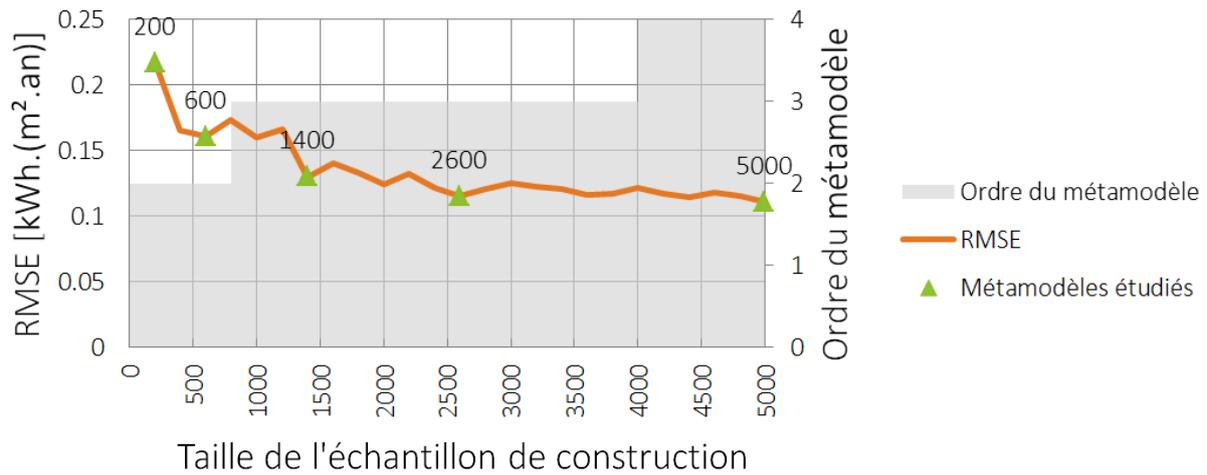


Figure 84 : Évolution de l'erreur RMSE et de l'ordre du métamodèle des besoins de chauffage (12 variables) selon la taille de l'échantillon de construction

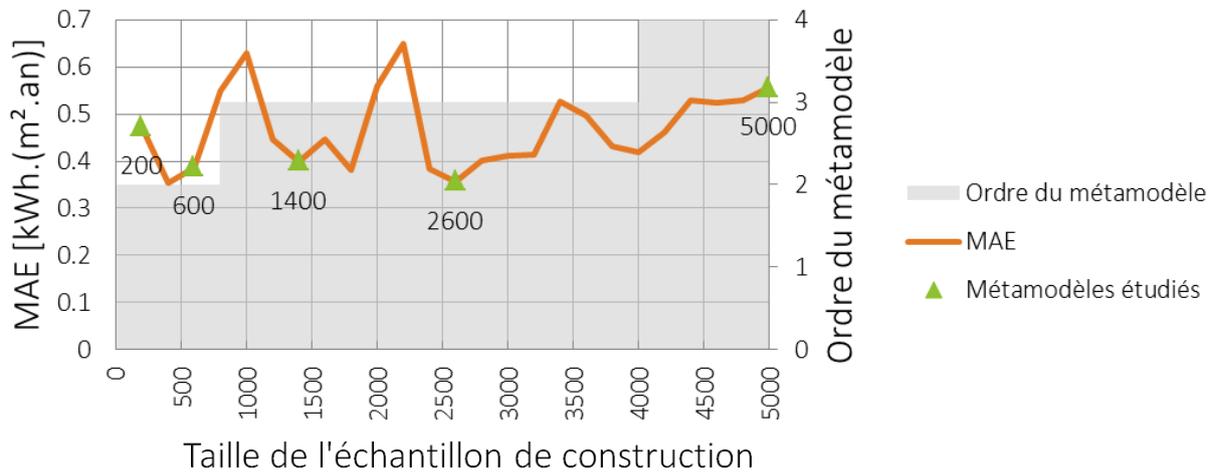


Figure 85 : Évolution de l'erreur MAE et de l'ordre du métamodèle des besoins de chauffage (12 variables) selon la taille de l'échantillon de construction

Pour les besoins de chauffage, les erreurs RMSE des métamodèles obtenues avec des échantillons de 2 600 et 1 400 évaluations et calculées sur les 2 000 solutions optimales sont très proches des erreurs de construction de ces deux métamodèles (Tableau 18). Ces erreurs sont près de deux fois moins importantes que celles obtenues avec un métamodèle de 5 000 solutions. Les métamodèles construits à partir de 2 600 et 1 400 évaluations sont de degrés 3 alors que le métamodèle construit avec 5 000 solutions est de degrés 4. Il apparaît donc que non seulement l'obtention d'un métamodèle de degrés 3 suffise pour modéliser les besoins de chauffage, mais également que l'obtention d'un métamodèle avec 5 000 simulations engendre un problème de surapprentissage (*overfitting*). Ce phénomène survient lorsque le modèle suit de trop près la base d'apprentissage et n'est plus représentatif des jeux de variables non visités (Van Gelder et al. 2014). Lors de la construction des métamodèles, l'erreur RMSE n'évolue plus significativement entre 2600 et 5000 évaluations. Avec des métamodèles d'ordre 2 l'erreur MAE augmente considérablement sur les solutions optimales et est supérieure à 1 kWh/(m².an).

Tableau 18 : Erreurs RMSE et MAE de métamodèles de besoins de chauffage (12 variables) construits avec un nombre d'évaluations variable

	CONSTRUCTION		OPTIMISATION	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
Métamodèle-Bch-5000	0,11	0,56	0,20	0,74
Métamodèle-Bch-2600	0,12	0,36	0,11	0,56
Métamodèle-Bch-1400	0,13	0,40	0,14	0,89
Métamodèle-Bch-600	0,16	0,39	0,23	1,21
Métamodèle-Bch-200	0,22	0,47	0,37	1,25

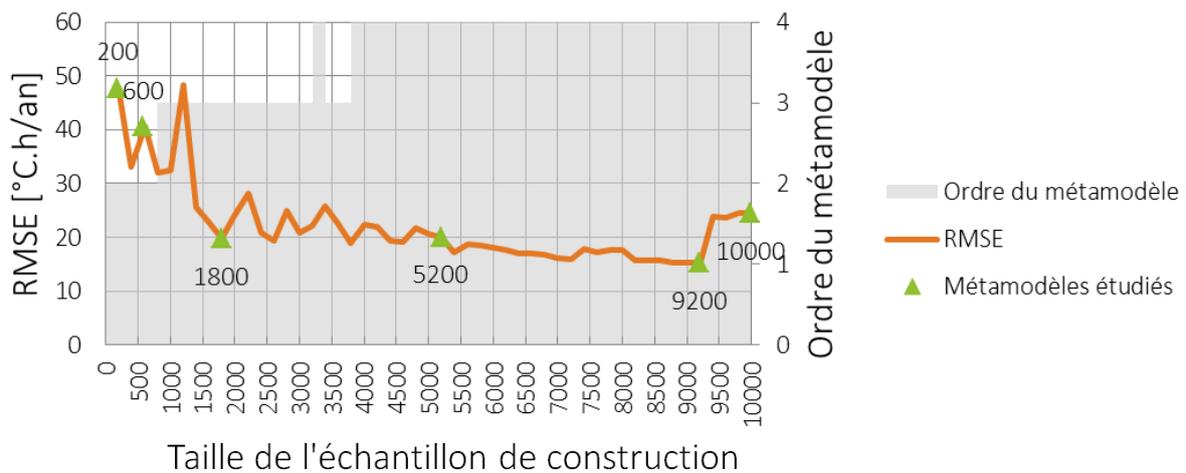


Figure 86 : Évolution de l'erreur RMSE et de l'ordre du métamodèle des degrés-heures d'inconfort (12 variables) selon la taille de l'échantillon de construction

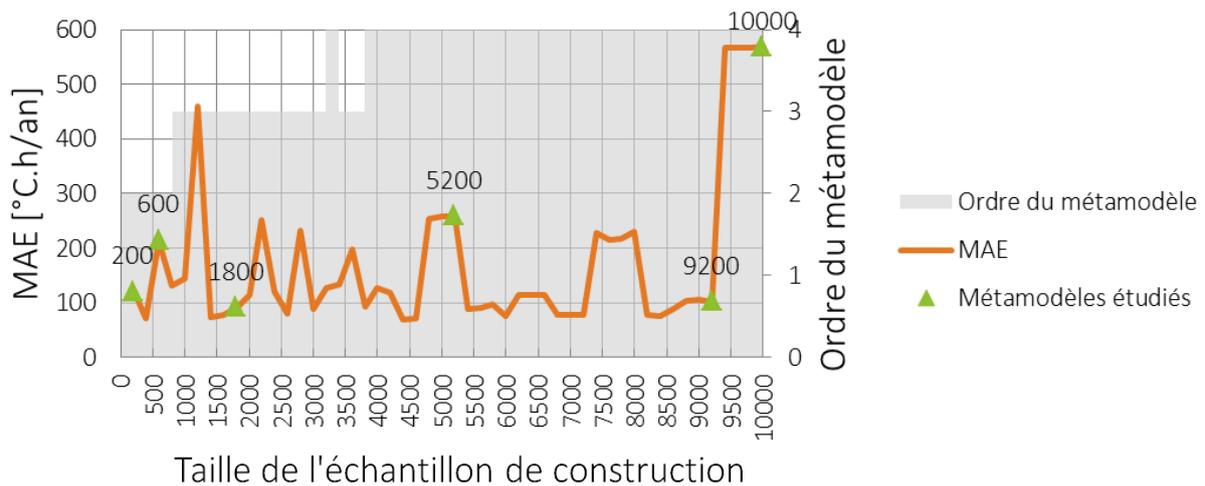


Figure 87 : Évolution de l'erreur MAE et de l'ordre du métamodèle des degrés-heures d'inconfort (12 variables) selon la taille de l'échantillon de construction

Pour les degrés-heures d'inconfort, les erreurs RMSE et MAE calculées sur les 2 000 solutions optimales restent globalement éloignées des erreurs calculées lors de la construction des métamodèles, sur leur base de validation (Tableau 19). Le métamodèle obtenu avec un échantillon de 9 200 évaluations du modèle numérique induit les erreurs les plus faibles par

rapport à la base de validation et aux 2 000 solutions optimales. Les erreurs obtenues avec le métamodèle construit avec une taille d'échantillon de 5200 évaluations sont très proches sur les 2 000 solutions optimales. Les erreurs augmentent pour les autres métamodèles dont le degré devient inférieur ou égal à 3.

Tableau 19 : Erreurs RMSE et MAE de métamodèles des degrés-heures d'inconfort (12 variables) construits avec un nombre d'évaluations variable

	CONSTRUCTION		OPTIMISATION	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
Métamodèle-DH-10000	24	570	53	513
Métamodèle- DH -9200	15	102	50	490
Métamodèle- DH -5200	20	257	59	513
Métamodèle- DH -1800	20	90	77	643
Métamodèle- DH -600	41	214	113	986
Métamodèle- DH -200	48	121	108	908

En conclusion, les métamodèles construits avec 12 variables sont beaucoup plus précis que ceux précédemment construits en négligeant certaines variables qui apparaissent non influentes au regard de l'une des deux grandeurs d'intérêt alors qu'elles l'étaient pour l'autre. Finalement il est préférable de conserver l'intégralité des variables significatives pour les besoins de chauffage et les degrés-heure d'inconfort. Le nombre d'évaluations nécessaire à la construction des métamodèles peut être réduit tout en conservant une précision acceptable.

Dans la suite de cette étude, les erreurs des métamodèles générés à partir des 12 variables sur la totalité de l'échantillon sont considérées comme acceptables. Les 20 223 solutions optimales sont alors analysées sans être évaluées sous le modèle numérique EnergyPlus.

V.3.c Analyse de la diversité des solutions obtenues

Les 20 223 solutions obtenues à l'issue de l'optimisation respectent les critères de prédimensionnement à l'Eurocode 5 et ont un niveau de confort vibratoire acceptable (section IV.4.d). Le front de Pareto, qui représente l'ensemble des solutions optimales, a été représenté selon les cinq fonctions-objectif prises deux à deux : plusieurs groupes de solutions ont été distingués selon le type de plancher intermédiaire (Figure 88), le type de mur extérieur (Figure 89) et le type de vitrage au Sud (Figure 90).

Globalement, l'augmentation de l'inertie d'un plancher bois avec une chape ou l'usage d'un plancher béton permet d'obtenir des solutions avec moins de degrés-heures d'inconfort. Les solutions qui minimisent les besoins de chauffage sont également des solutions dont le plancher est en béton ou comporte une chape. En contrepartie, ce sont les solutions à plus faible inertie, telles que les solutions avec des planchers à solives sans chape qui minimisent l'impact environnemental avec un potentiel de réchauffement climatique et une énergie grise relativement faibles par rapport aux autres solutions. Concernant le niveau de confort vibratoire les solutions comportant des planchers bois avec chape ont des niveaux de performance « très bon » (1) ou « excellent » (0). Pour les solutions avec des planchers à solives, les niveaux performance vont « d'excellent » (0) à « acceptable » (3).

L'optimisation n'a mené vers aucune solution CLT sans chape. Ce type de plancher intermédiaire ne permet donc pas d'obtenir des compromis Pareto-optimaux au regard des objectifs. Les solutions avec un type de plancher CLT avec chape ont des performances proches de celles avec un type de plancher béton. Elles diffèrent au niveau de l'énergie grise et du potentiel de réchauffement climatique. D'après les FDES utilisées (Annexe G), le bois lamellé-collé nécessite deux fois plus d'énergie grise par mètre cube de matériau que le béton, mais a un potentiel de réchauffement climatique plus de 4 fois moins important que ce dernier.

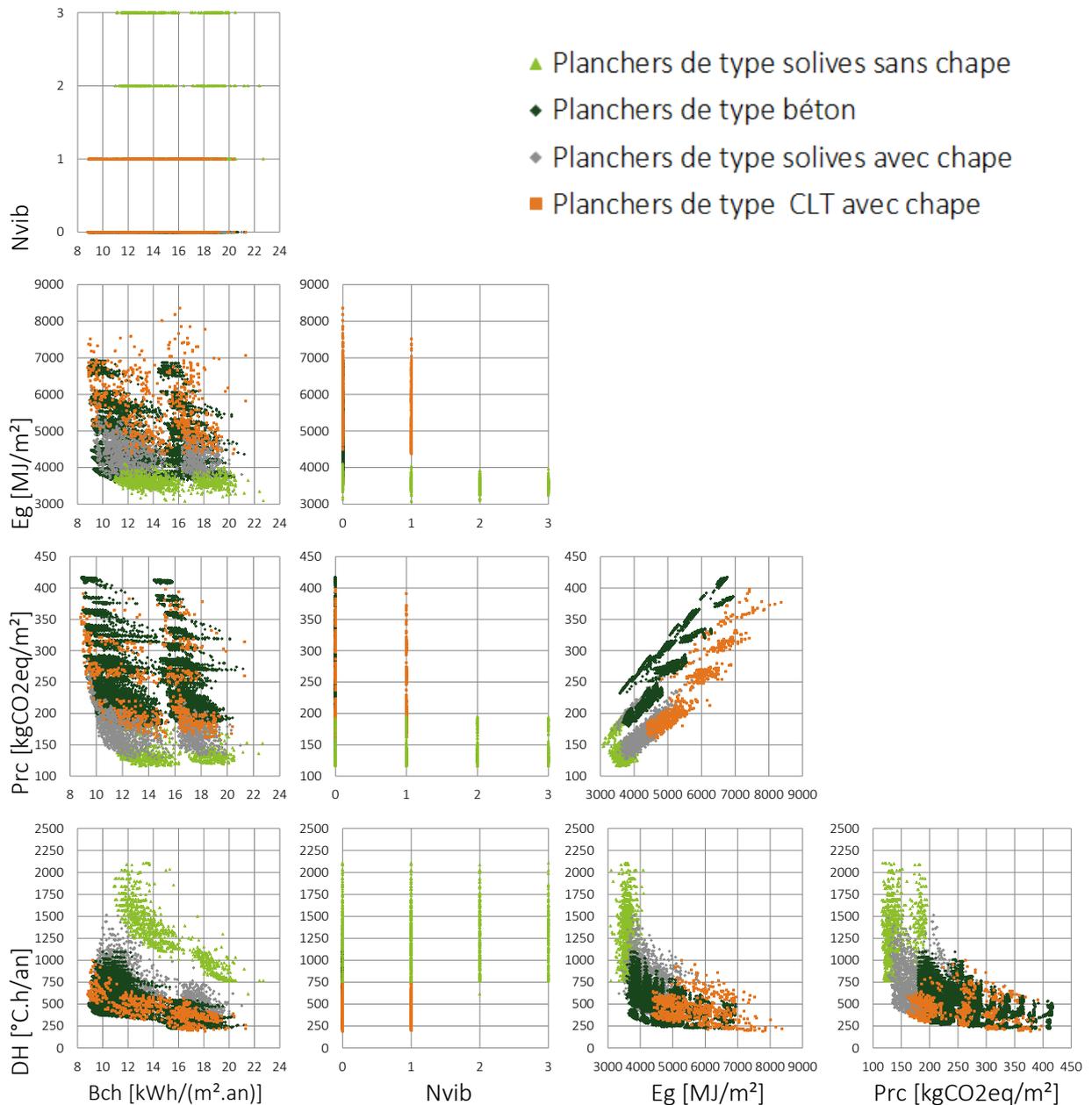


Figure 88 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux en fonction du type de plancher intermédiaire

Tout comme pour les types de plancher, les types de mur induisent des regroupements de performance vis-à-vis des solutions obtenues. Les murs à ossature bois tendent vers un plus faible impact environnemental ce qui explique que les trois quart des solutions obtenues en soient constituées. Les solutions constituées de murs CLT font partie des meilleurs compromis en terme de besoins de chauffage et degrés-heures d'inconfort estival. Cela s'explique notamment par l'apport d'une résistance thermique supplémentaire par le panneau CLT.

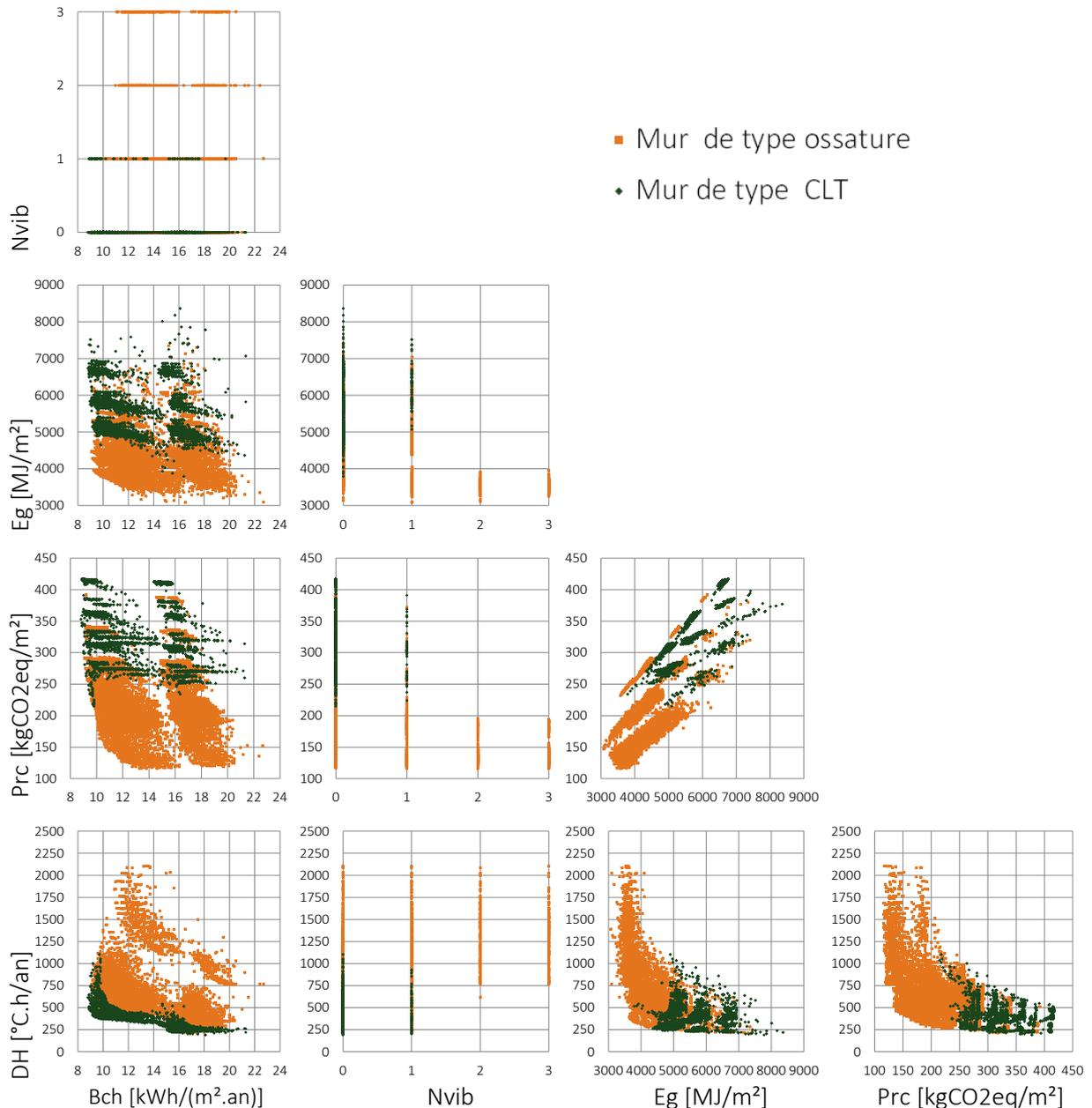
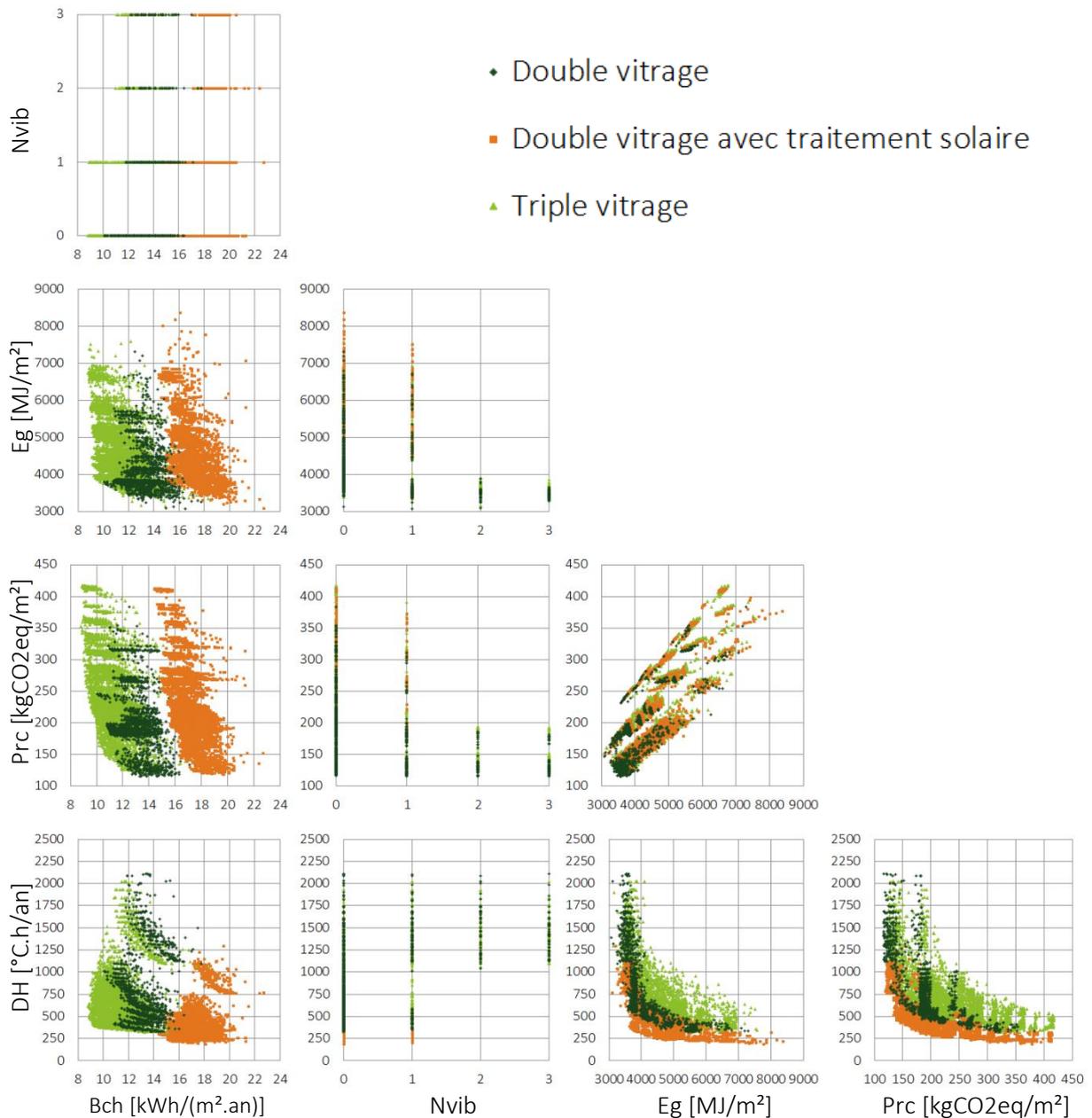


Figure 89 : Représentation du front de Pareto selon les fonctions-objectif prises deux à deux en fonction du type de mur extérieur

Un autre regroupement de solutions peut être réalisé selon le type de vitrage utilisé pour la grande baie vitrée sud. Les fenêtres à double vitrage avec traitement solaire permettent d'obtenir les meilleures solutions en matière de degrés-heure d'inconfort. En contrepartie, les besoins de chauffage sont augmentés. Les solutions qui minimisent les besoins de chauffage sont constituées de menuiseries Sud avec triple vitrage. Par ailleurs, certaines solutions avec

double vitrage sans traitement solaire ont des performances semblables à celles constituées de triple vitrage. Par exemple, les déperditions thermiques supplémentaires des doubles vitrages peuvent être compensées par des apports solaires supplémentaires résultant du vitrage lui-même (facteur solaire plus important) mais également par une plus petite profondeur de casquette solaire ou bien par une meilleure isolation thermique. Le choix du vitrage dépend ainsi des performances thermiques intrinsèques au vitrage, mais également des choix réalisés parmi les autres variables de décision. Dans ce cas d'étude, l'utilisation d'un double vitrage standard au Sud peut ainsi être un bon compromis entre le triple vitrage et le double vitrage avec traitement solaire.



Le type de vitrage et le type de mur n'ont en théorie pas d'influence sur le niveau de confort vibratoire des planchers. Néanmoins, ils peuvent avoir un impact sur le type de plancher intermédiaire et donc indirectement sur leur niveau d'inconfort vibratoire. Par exemple, le type de mur ossature peut être associé à des planchers ayant un niveau d'inconfort vibratoire allant de (0) à (3) alors que le type de mur CLT est associé uniquement à des planchers ayant un niveau d'inconfort vibratoire de (0) ou (1). Dans le cas du type de vitrage il n'y a pas d'effet notable relevé entre le type de vitrage et le niveau d'inconfort vibratoire. Ces constats soulignent que l'influence d'une variable sur un objectif n'est pas facilement prévisible. En effet, il y a beaucoup d'interactions possibles entre les différentes variables. Ces interactions ne sont généralement pas prises en compte dans la conception multicritère du bâtiment. L'usage de méthode d'optimisation multiobjectif permet ici d'observer et de considérer l'influence et les interactions des variables de décisions sur les fonctions-objectif.

Afin de visualiser sur un même graphique les variables de décisions et les performances de chacune des solutions optimales, il est possible de passer par une représentation par coordonnées parallèles. Inventé par D'Ocagne (1885), ce type de graphique permet de visualiser une quantité d'information importante et au-delà de trois dimensions ; il suffit de rajouter un axe parallèle pour ajouter une dimension. L'outil gratuit XDAT³⁴ (X-dimensional Data Analysis Tool) a donc été utilisé pour représenter les solutions du front de Pareto.

Ainsi, la Figure 91 permet de représenter l'ensemble des solutions du front de Pareto où chaque trait vert représente une solution qui relie les axes suivant : le type de plancher intermédiaire (Type_PI), l'épaisseur de la chape en m (Ep_chape), le type de mur extérieur (Type_ME), l'épaisseur d'isolant extérieur du mur extérieur en m (Ep_isol_ME_ext), la profondeur de la casquette en m (Prof_c), l'épaisseur de revêtement (Ep_rev, ici représenté par le nombre de panneaux où $x_1=0,013\text{m}$; $x_2=0,026\text{m}$ et $x_3=0,039\text{m}$), le type d'isolant extérieur (Type_isol_ME_ext), le type de fenêtre Sud (Type_fen_Sud) et Nord-Ouest (Type_fen_O), le type de revêtement intérieur (Type_rev), les degrés-heure d'inconfort thermique estival en °C.h/an (DH), les besoins de chauffage en kWh/(m².an) (Bch), le niveau de confort vibratoire (Nvib), l'énergie grise en MJ/m² (Eg) et le potentiel de réchauffement climatique en eqCO₂/m² (Prc).

La solution représentée par un trait gris épais correspond au cas de référence. Le niveau de confort vibratoire du plancher intermédiaire du cas de référence constitué d'un panneau CLT et d'une chape de 8 cm n'a pas été évalué comme étant acceptable avec la méthode prédimensionnement utilisée.

³⁴ XDAT –outil gratuit de représentation par coordonnées parallèles disponible sur www.xdat.org (consulté le 29 juillet 2015)

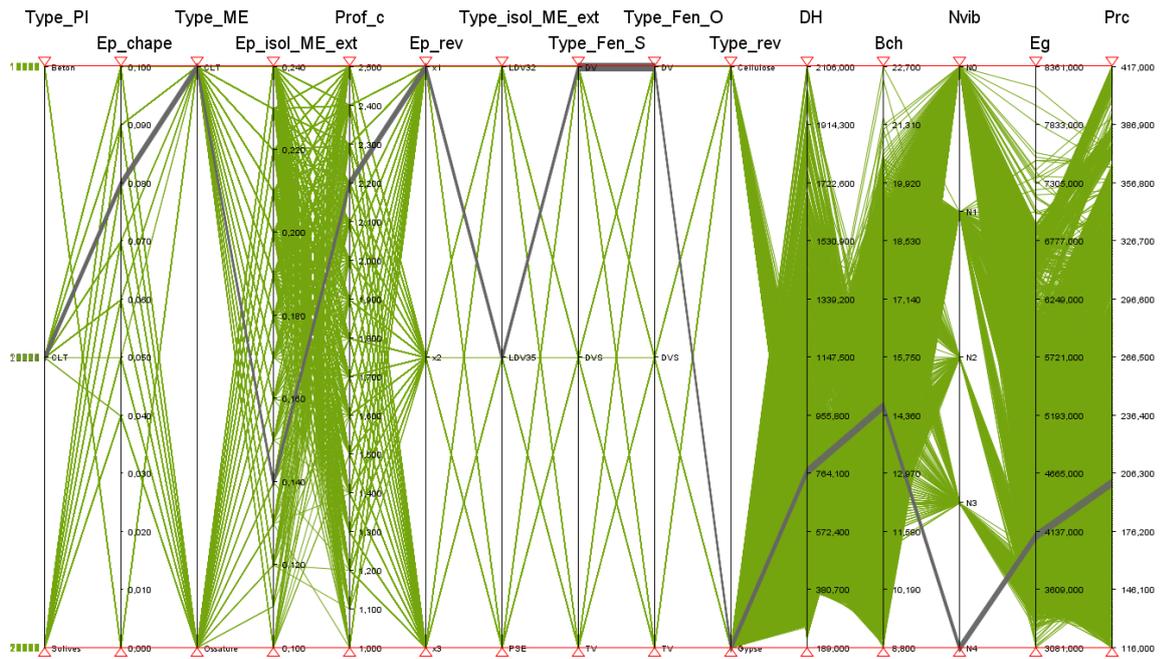


Figure 91 : Graphe parallélisé représentant les 14 123 solutions obtenues et le cas de référence

D'après la Figure 91, le front de Pareto est très varié. Les différentes solutions s'étendent sur l'ensemble des plages de conception des variables de décisions considérées. Un premier constat peut être alors être fait sur la diversité des solutions.

Afin d'analyser les solutions, il est possible de faire glisser les curseurs de chacun des axes pour ne sélectionner qu'une partie des solutions et les classer par groupe de couleur distinct. La représentation par coordonnées parallélisées est un outil interactif qui peut être utilisé au cours de réunions regroupant les différents acteurs du projet de construction. Ainsi en modifiant les différents curseurs il est possible de réduire rapidement le nombre de solutions retenues et parmi lesquelles un choix doit être fait. Par exemple, les choix peuvent être restreints à un type de vitrage ou de plancher. Il est également possible de fixer une valeur seuil à ne pas dépasser pour certains objectifs.

Sur la Figure 92, seules les solutions proches ou qui dominent le cas de référence sur l'ensemble des objectifs ont été représentées. Des valeurs seuils ont alors été fixées par rapport aux performances du cas de référence pour les différents objectifs avec $DH=773$ °C.h ; $Bch=14,6$ kWh/(m².an), $N_{vib}=4$; $Eg=4105$ MJ/m² ; $Prc=202$ kgCO₂/m². Parmi les solutions obtenues, aucune solution ne comporte de panneau CLT. Il n'y a pas non plus de solutions ayant des planchers intermédiaires à solives et sans chape. L'épaisseur d'isolation extérieure est au minimum de 17 cm et la profondeur de la casquette de 1,3 m. Il y a au maximum deux plaques de gypse et les fenêtres Sud ne sont jamais composées de double vitrage avec traitement solaire.

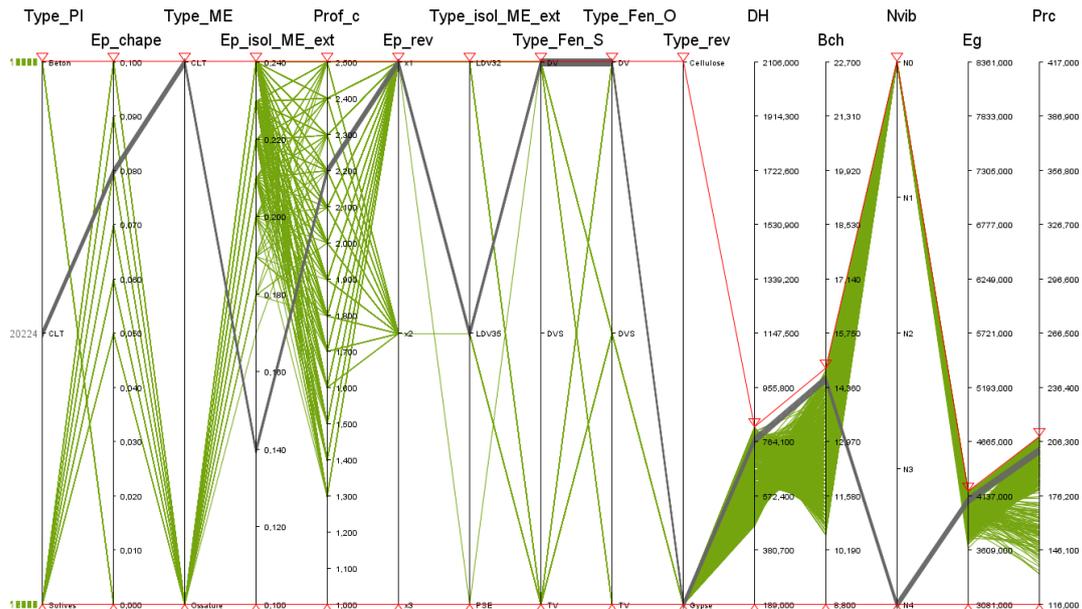


Figure 92 : Graphe parallélisé représentant le cas de référence et les solutions qui le domine au regard de tous les objectifs

Parmi les solutions du front de Pareto, cinq solutions ont été sélectionnées (Tableau 20) et leurs performances ont été comparées à la solution de référence (Tableau 21) :

- Solution 1 : Cette solution est proche du cas de référence en matière de performance, mais est très différente pour ce qui est du système constructif. Par exemple, cette solution est composée de planchers intermédiaires à solives avec une chape de 5cm et de murs à ossature bois. Il est à noter que cette solution fait partie des solutions qui dominent le cas de référence sur l'ensemble des objectifs.
- Solution 2 : Cette solution est la solution qui minimise les degrés-heure d'inconfort estival avec 189 °C.h/an. Elle est composée de planchers intermédiaires en panneaux CLT recouverts d'une chape de 10 cm. Elle est également composée de murs en panneaux CLT. Les revêtements intérieurs sont constitués de trois couches de panneaux constitués d'un mélange gypse et cellulose (3,9 cm). Enfin, les vitrages de cette solution sont des doubles vitrages avec traitement solaire. C'est donc une solution qui globalement possède beaucoup d'inertie et qui limite le rayonnement solaire. Bien qu'intéressante en ce qui concerne les degrés-heures d'inconfort et le niveau de confort vibratoire (0), les besoins de chauffage (18,1 kWh/(m².an)), le potentiel de réchauffement climatique (378 CO₂eq/m²) et l'énergie grise (7780 MJ/m²) sont élevés vis-à-vis des autres solutions obtenues. Cette solution fait donc partie des moins bons compromis relativement à l'impact environnemental.
- Solution 3 : C'est la solution qui minimise les besoins de chauffage avec 8,8 kWh/(m².an). Elle n'est pourtant pas foncièrement différente de la solution 2 puisqu'elle est également composée de planchers intermédiaires en panneau CLT avec chape de 10 cm et de murs CLT. Les revêtements intérieurs sont ici composés de deux panneaux de mélange de gypse-cellulose (2,6 cm). L'épaisseur d'isolation est maximale avec 24cm et le vitrage utilisé est un triple vitrage.
- Solution 4 : Cette solution est l'une des meilleures solutions en matière d'impact environnemental avec une énergie grise de 3304 MJ/m² et un potentiel de

réchauffement climatique de 133 CO_{2eq}/m². En contrepartie, cette solution fait partie des moins bonnes solutions pour ce qui est du niveau de confort vibratoire (2), des besoins de chauffage (17,5 kWh/(m².an)) et de l'inconfort thermique estival (1499 °C.h).

- Solution 5 : Cette solution est une autre des solutions qui dominent le cas de référence sur l'ensemble des objectifs. Mis à part qu'elle possède un plancher intermédiaire en béton et un mur à ossature, cette solution reste très poche de la solution de référence. Elle possède un seul panneau de gypse, des doubles vitrages sans traitement solaire et un isolant de type laine de verre avec une conductivité thermique de 0,035 W/(m.K). L'épaisseur d'isolation est de 4 cm de plus que le cas de référence et la profondeur de casquette de 0,2 m de moins. Cette solution a globalement des performances proches du cas de référence, mais possède une énergie grise beaucoup plus faible (3671 MJ/m²).

Tableau 20 : Caractéristiques du cas de référence et des solutions sélectionnées

Variables	Description	Unité	Ref	Sol ₁	Sol ₂	Sol ₃	Sol ₄	Sol ₅
Type_PI	Type de plancher intermédiaire	-	CLT	Sol.	CLT	CLT	Sol.	Bét.
nb_plis_PI	Nombre de plis CLT	-	3	-	7	5	-	-
h_plis_T_PI	Épaisseur des plis CLT transversaux	m	0,02	-	0,02 6	0,06	-	-
h_plis_L_PI	Épaisseur des plis CLT longitudinaux	m	0,04	-	0,08	0,03 4	-	-
h_plis_L_Plb	Épaisseur des plis CLT extérieurs longitudinaux pour les panneaux 5 plis	m	-	-	-	0,05 3	-	-
nb_rt	Nombre de renfort	-	-	7	-	-	1	-
h_sol	Hauteur des solives	m	-	0,4	-	-	0,23	-
b_sol	Épaisseur des solives	m	-	0,07	-	-	0,18	-
e_sol	Entraxe des solives	m	-	0,6	-	-	0,6	-
Ep_chape	Épaisseur de la chape béton	m	0,08	0,05	0,1	0,1	0	-
Type_ME	Type de mur extérieur	-	CLT	Oss.	CLT	CLT	Oss.	Oss.
h_plis_T_ME	Épaisseur des plis CLT transversaux	m	0,02	-	0,03	0,02 7	-	-
h_plis_L_ME	Épaisseur des plis CLT longitudinaux	m	0,03	-	0,02 6	0,02 7	-	-
L_montants	Largeur des montants	m	-	0,24	-	-	0,1	0,18
b_montants	Épaisseur des montants	m	-	0,06 7	-	-	0,06 7	0,07
e_montants	Entraxe des montants	m	-	0,3	-	-	0,3	0,3
Ep_isol_ME_ext	Épaisseur du complexe isolant extérieur	m	0,14	0,24	0,13	0,24	0,1	0,18
Type_isol_ME_ext	Matériau de l'isolant extérieur	m	LDV ₃₅	LDV ₃₅	PSE	PSE	LDV ₃₅	LDV ₃₅
Ep_rev	Épaisseur du panneau de revêtement intérieur des plafonds, cloisons et murs extérieurs	m	0,01 3	0,01 3	0,03 9	0,02 6	0,01 3	0,01 3
Type_rev	Type de panneau de revêtement	m	Gyp.	Gyp.	Cell.	Cell.	Gyp.	Gyp.
Type_fen_S	Type de fenêtre Sud	-	DV	TV	DVS	TV	DV	DV
Type_fen_O	Type de fenêtre Ouest et Nord	-	DV	DVS	DVS	TV	DV	DV
Prof_c	Profondeur des protections solaires	m	2,2	2,1	1,8	1,4	1,7	2,0

Tableau 21 : Performances du cas de référence et des solutions de références pour l'ensemble des objectifs considérés

	Ref	Sol_1	Sol_2	Sol_3	Sol_4	Sol_5
Inconfort thermique estival [$^{\circ}\text{C.h/m}$]	773	769	189	612	1499	753
Besoins de chauffage [$\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$]	14,6	13,2	18,1	8,8	17,5	13,9
Niveau de confort vibratoire	4	0	0	0	2	0
Energie grise [MJ/m^2]	4105	3939	7780	6732	3304	3671
Potentiel de réchauffement climatique [$\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$]	202	140	378	353	133	186

Concernant l'optimisation de la structure porteuse, certaines solutions comme la solution 4 sont constituées de murs à ossature avec des montants de faible hauteur (épaisseur de l'isolant extérieur des murs extérieurs). L'ensemble des solutions constituées de murs à ossature bois et d'une épaisseur de montant (égale à l'épaisseur d'isolant) inférieure à 14 cm ont été sélectionnées en déplaçant les curseurs du graphe parallélisé représenté en Figure 93. L'ensemble des solutions obtenues sont constituées de planchers à solives sans chape. Il apparaît donc que les murs à ossature bois de faible épaisseur requièrent des planchers légers pour respecter les critères de dimensionnement considérés. Les planchers intermédiaires compatibles avec des montants de hauteur inférieure à 14 cm sont donc des planchers à solives et sans chape. Une chape légère de 40 mm peut être compatible avec des montants de 16 cm.

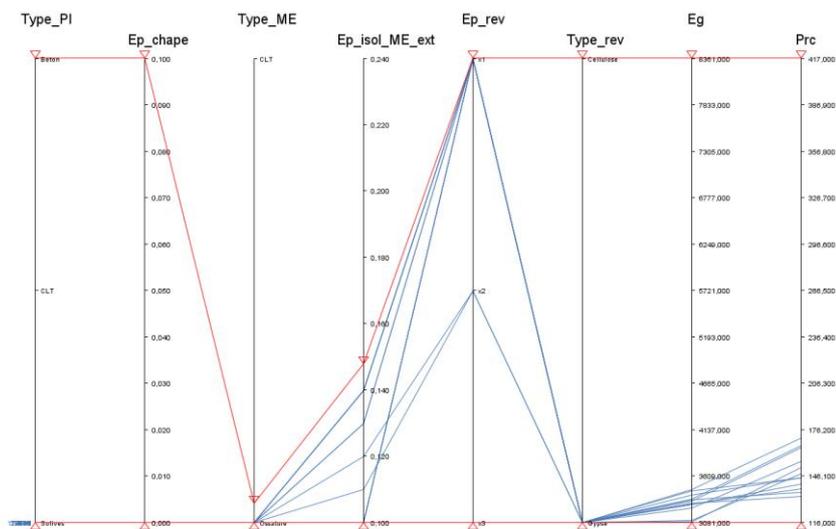


Figure 93 : Graphe parallélisé représentant les solutions avec mur à ossature bois avec une hauteur de montant inférieur à 14 cm.

Une analyse des structures porteuses obtenues indique que certaines variables de décision relatives à la composition de la structure des planchers intermédiaires en bois et des murs extérieurs peuvent encore être modifiées pour améliorer les objectifs d'optimisation. Par exemple le nombre de renforts, la hauteur, l'épaisseur et l'entraxe des solives des planchers de type à solives de certaines solutions peuvent être améliorées pour diminuer l'énergie grise et le potentiel de réchauffement climatique tout en maintenant le même niveau de confort vibratoire. C'est le cas de la solution 1 pour laquelle une hauteur de solives de 0,36 m plutôt que 0,4 m et l'absence de renfort plutôt que l'utilisation de 7 étrépillons aurait suffi pour obtenir le même niveau de confort vibratoire. Ces variables n'influencent pas les besoins de chauffage ni les degrés-heures d'inconfort thermique estival, mais principalement le niveau de confort

vibratoire et plus légèrement l'énergie grise et le potentiel de réchauffement climatique. Pour améliorer l'optimisation des solutions, trois options peuvent être envisagées :

- Diminuer l'espace de variation des variables de décision : par exemple, il est possible de limiter le nombre de valeurs prises par la hauteur des solives à celles de produits disponibles chez un industriel donné.
- Traiter les solutions après optimisation : en les améliorant manuellement ou en effectuant d'autres optimisations après avoir fixé un certain nombre de variables de décision.
- Imposer des compositions de planchers intermédiaires ou de murs extérieurs : par exemple pour les planchers à solives, le nombre de renforts, la hauteur, l'épaisseur et l'entraxe des solives pourraient ne plus être des variables de décisions et dépendraient de plusieurs types de planchers à solives dont les compositions sont prédéterminées.

En conclusion, la diversité des solutions obtenues est très importante. Certaines solutions optimales peuvent avoir des performances proches tout en ayant des systèmes constructifs très différents comme cela est le cas pour les solutions 1 et 6. **L'optimisation permet d'une part l'obtention de solutions de compromis Pareto-optimaux parmi lesquelles le décideur pourra effectuer un choix. Cette optimisation permet également l'analyse de l'influence des variables sur les résultats telles que le type de plancher, de mur ou de vitrage.** Une telle analyse n'aurait pas pu être effectuée avec la méthodologie où l'étape de décision est réalisée avant l'exécution de la méthode d'optimisation et où une seule solution correspondante au compromis préalablement fixé par le décideur est obtenue.

Pour réaliser un choix, les méthodes de surclassement de synthèse sont à privilégier (page 62) et leur utilisation pour compléter la méthodologie développée reste une perspective d'apport à ces travaux. Ces méthodes permettent notamment de sélectionner ou de trier plusieurs solutions. Néanmoins lorsque le nombre de solution est très important, la représentation par coordonnées parallélisées permet de sélectionner rapidement une ou plusieurs solutions correspondant à la volonté des différents acteurs d'un projet. Bien qu'il s'agisse d'une sélection arbitraire, la représentation par coordonnées parallélisées est un outil puissant pouvant être utilisé au cours de réunions rassemblant de multiples acteurs provenant de disciplines différentes et permettant de réaliser un support à l'ingénierie simultanée.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Ces travaux de thèse ont porté sur le développement d'une méthode d'optimisation de systèmes constructifs bois multiétages tenant compte de compromis entre des objectifs relatifs au confort des occupants et à l'impact environnemental du bâtiment, mais également de contraintes liées à la sécurité de l'ouvrage.

Comme il a été vu dans le **Chapitre I**, dédié au contexte de la construction bois multiétage en France et à l'international, le bois est actuellement peu utilisé dans le bâtiment. Bien que la part de marché des constructions bois soit croissante en France, celle-ci reste minoritaire vis-à-vis de celle des constructions traditionnelles. Pourtant il n'existe pas de freins réglementaires rédhibitoires à son développement. Ce sont les manques de savoir-faire, de confiance et d'industrialisation qui freinent majoritairement l'usage de bois dans la construction. Les freins d'ordres techniques et économiques ont déjà été levés dans des constructions multiétages exemplaires en France et à l'international. S'appuyant sur la mixité des matériaux, des projets visent même la construction de bâtiment bois de grande hauteur. Une tour de bois nommée « Hoho » est ainsi envisagée à Vienne en Autriche. L'immeuble de 84 mètres de haut devra être conçu en bois à près de 76% et en béton pour les 24% restant. Mais la construction bois multiétage reste une technique constructive peu courante devant faire ses preuves face aux techniques de construction conventionnelles. Le manque de méthodes et d'outils favorisant l'utilisation du bois dans la construction est un frein à sa compétitivité. Pour promouvoir l'usage de bois dans la structure des bâtiments multiétages, **une méthode de conception multicritère de bâtiments bois multiétage a donc été développée**. Cette méthode prend en compte des contraintes réglementaires en matière de sécurité de l'ouvrage et permet d'aboutir à des solutions techniques compétitives à faible émission de gaz à effet de serre qui allient efficacité énergétique et confort des occupants.

Le **Chapitre II** a consisté en un état de l'art des méthodes de conception multicritère employées dans la conception de bâtiment. La recherche scientifique dans le domaine de l'optimisation multiobjectif des bâtiments est en plein essor. Le problème de l'optimisation multiobjectif d'un bâtiment est un problème complexe dont la résolution consiste à rechercher et choisir l'un des meilleurs compromis Pareto-optimum dans un espace de solutions de très grande dimension. Il est alors nécessaire d'avoir recours à une étape d'optimisation et une étape de prise de décision.

Trois méthodologies d'optimisation existantes ont été relevées. Il est essentiel de prendre en compte le point de vue et l'intégration du décideur dans le choix de la méthodologie. La première consiste à déterminer un compromis avant d'exécuter la méthode d'optimisation mono-objectif. Dans cette méthode, la fonction-objectif résulte le plus souvent d'une agrégation de plusieurs fonctions-objectif. Cette méthode ne nécessite qu'une seule recherche pour obtenir le compromis souhaité. En contrepartie, elle requiert de faire intervenir le

décideur très en amont et donc d'avoir une bonne connaissance du problème à optimiser. L'unique solution obtenue est également susceptible de ne finalement pas satisfaire le décideur. Selon la seconde méthodologie, l'optimisation multiobjectif est suivie de la prise de décision. Les préférences du décideur n'ont pas besoin d'être intégrées avant l'exécution de la méthode d'optimisation. Cette méthode permet au décideur de choisir une solution parmi un ensemble de solutions Pareto-optimales. La troisième méthodologie est basée sur une prise de décision progressive au cours d'étapes d'optimisation multiobjectif successives. Cette méthode demande la présence du décideur tout au long de l'optimisation ce qui n'est pas toujours envisageable.

Le choix a alors été porté sur la seconde méthode et donc sur le développement d'une méthodologie permettant l'obtention d'un ensemble de compromis Pareto-optimaux parmi lesquels des choix pourront être faits par le décideur sur d'autres critères. Cette méthode ne nécessite pas une connaissance accrue du problème à optimiser par le décideur et a l'avantage de lui proposer plusieurs solutions. Il est néanmoins important de noter que la prise en compte d'un nombre important d'objectifs (au-delà de quatre) peut induire des difficultés et nécessiter le développement de méthodes d'optimisation multiobjectif spécifiques (Hisao Ishibuchi et al. 2008).

Les chapitres suivants ont consisté à appliquer et développer la méthodologie d'optimisation multiobjectif sur un cas d'étude concret inspiré d'un bâtiment réel en bois et constitué de quatre logements collectifs superposés. Dans le **Chapitre III** les objectifs pertinents ont été choisis et les variables significatives sélectionnées. Les fonctions-objectif correspondantes ont ensuite été modélisées dans le **Chapitre IV**. Enfin, la méthode d'optimisation multiobjectif a été mise en œuvre dans le **Chapitre V**.

Cinq objectifs pertinents ont été choisis pour optimiser le cas d'étude :

- Dans les constructions multiétages se pose la question de la composition des planchers intermédiaires et de l'obtention d'un confort vibratoire convenable. Un premier objectif choisi est donc la **maximisation du confort vibratoire des planchers intermédiaires**.
- De par la faible masse volumique du bois, les constructions bois ont un niveau d'inertie thermique peu élevé comparativement aux systèmes constructifs traditionnels. L'obtention d'un confort thermique estival convenable sans avoir recours à un système de climatisation actif est donc plus délicate. La **minimisation de l'inconfort thermique estival** a donc également été retenue comme objectif pertinent.
- Pour limiter les dépenses énergétiques du bâtiment sur son cycle de vie, deux objectifs ont été choisis. L'un consiste à minimiser l'**énergie blanche** consommée durant la phase d'exploitation du bâtiment. Il s'agit alors dans cette étude de **minimiser les besoins de chauffage**. L'autre consiste à **minimiser l'énergie grise** nécessaire aux autres phases de vie du bâtiment (production, transport, construction et fin de vie).
- Enfin, un dernier objectif choisi et répondant à des objectifs internationaux (protocole de Kyoto) consiste à **minimiser le potentiel de réchauffement climatique** résultant des GES.

Pour de raisons liées à un manque de connaissance et de temps nécessaire à son développement, certains objectifs pertinents tels que la maximisation du confort acoustique et du confort visuel n'ont pas été retenus.

Afin de sélectionner les variables de décision significatives, des analyses de sensibilité ont été réalisées sur les objectifs relatifs à l'inconfort thermique estival et aux besoins de chauffage. La méthode de Morris qui nécessite peu d'évaluations du modèle initial est à privilégier lorsque le nombre de variables à considérer est important (supérieur à 20). L'utilisation des indices de Sobol est plus précise et est à favoriser lorsque le nombre de variables est faible (inférieur à 20). Face au nombre d'évaluations du modèle de simulation thermique dynamique généralement important et nécessaire pour obtenir les indices de Sobol, il a été choisi de calculer des indices de Sobol approchés à partir des coefficients de métamodèles construits par la méthode des polynômes du chaos.

Le temps d'évaluation des métamodèles qui sont des fonctions polynomiales est instantané par rapport à celui nécessaire pour les modèles de STD : pour le cas d'étude, 8 secondes sont nécessaires pour l'évaluation des besoins de chauffages et 6 secondes pour les degrés-heures d'inconfort avec le logiciel EnergyPlus. Ces temps de calcul peuvent largement être augmentés selon la complexité du modèle initial est atteindre plusieurs minutes. Afin de réduire le temps de calcul nécessaire à l'optimisation, les fonctions-objectif de thermique ont été modélisées via la construction de métamodèles par la méthode des polynômes du chaos. La construction des métamodèles du cas d'étude a été réalisée à partir d'un échantillon de 10 000 évaluations pour les degrés-heures d'inconfort (17h de calcul) et de 5 000 évaluations pour les besoins de chauffage (11h de calcul). Le nombre de simulations peut être réduit en obtenant des erreurs de prédiction plus élevées, mais potentiellement acceptables selon un concepteur donné. Enfin les temps de calcul peuvent être réduits en distribuant les travaux.

Enfin, pour le confort vibratoire des planchers intermédiaires, l'énergie grise et le potentiel de réchauffement climatique, des fonctions analytiques simples ont été modélisées. Les contraintes relatives à la sécurité de l'ouvrage et au confort vibratoire minimum à respecter ont été choisies et intégrées au problème à optimiser.

Les variables de décisions sélectionnées sont hétérogènes. Elles peuvent être quantitatives continues (p. ex : épaisseur d'une chape), quantitatives discrètes (p. ex : nombre de plis d'un panneau CLT) ou qualitatives nominales (p. ex : type de plancher intermédiaire, il peut s'agir d'un « plancher à solives » ou encore d'un « plancher CLT »).

Le problème d'optimisation peut donc être qualifié de problème d'optimisation multiobjectif contraint à variables hétérogènes. Étendue à des problèmes d'optimisation multiobjectif (Hu et al. 2003) et à variables hétérogènes (Kennedy and Eberhart 1997; Michaud et al. 2009), la méthode d'optimisation par essaim particulaire (Eberhart and Kennedy 1995) offre l'avantage de pouvoir optimiser des fonctions-objectif quelconques (fonctions numériques et symboliques et algorithmes) de dimension quelconque et mettant en œuvre des variables hétérogènes. De plus, le MOPSO possède peu de paramètres de réglage et est facile à appréhender ce qui en fait un algorithme de choix pour un outil à disposition de l'ingénieur. Cette méthode d'optimisation a donc été privilégiée dans ce travail pour optimiser simultanément les cinq objectifs contradictoires.

Pour le réglage des paramètres du MOPSO, des variations paramétriques ont été réalisées indiquant qu'un grand nombre d'itérations et de particules est nécessaire pour obtenir un maximum de solutions optimales. Un paramétrage a alors été choisi permettant d'obtenir plus de 14 000 compromis Pareto-optimaux. Une optimisation avec un essaim de 500 particules et 1000 itérations a été réalisée. En tout, 500 000 points de l'espace des solutions ont donc été visités et l'optimisation a nécessité 9h de calcul. Si l'ensemble des solutions évaluées avait été calculé à partir le modèle numérique de STD, plus de 80 jours auraient été nécessaires à leur évaluation.

La méthode d'optimisation a été mise en œuvre. Les besoins de chauffage et le degré-heure d'inconfort des compromis obtenus ont ensuite été recalculés via les modèles détaillés de STD. Les résultats ont montré un manque de précision notamment pour les besoins de chauffage. D'autres métamodèles ont alors été construits en révisant le choix des variables effectué lors des analyses de sensibilité. Les nouveaux métamodèles obtenus ont une précision jugée acceptable avec une erreur RMSE de 0,2 kWh/(m².an) pour les besoins de chauffage et de 53 °C.h/an pour les degrés-heures d'inconfort.

Une nouvelle optimisation a été réalisée à partir de ces nouveaux métamodèles et a permis d'obtenir plus de 20 000 compromis Pareto-optimaux. L'analyse des résultats permet de tirer quelques conclusions intéressantes sur le cas d'étude :

- La solution de référence, qui représente le bâtiment réel, est dominée par plusieurs solutions sur l'ensemble des objectifs considérés. Parmi ces solutions, aucune n'est constituée de panneaux CLT. Les systèmes constructifs constitués de panneaux CLT ne sont donc pas nécessairement optimaux pour des bâtiments de quatre niveaux où les charges à reprendre restent tolérables pour des systèmes constructifs à ossature bois. En effet, le CLT nécessite de grandes quantités de bois et donc une énergie grise et un potentiel de réchauffement climatique élevé comparativement à l'ossature bois. Les solutions peuvent être regroupées selon les types de variables considérées. Cela permet notamment d'observer la sensibilité des objectifs selon les variables considérées. L'usage d'un plancher ou d'une chape béton apparaît par exemple nécessaire pour limiter l'inconfort thermique estival.
- L'épaisseur des montants d'ossature des solutions obtenues dépend des besoins de chauffage, mais également des charges permanentes à reprendre induites par les planchers intermédiaires et les revêtements.

La méthode d'optimisation développée permet d'obtenir une grande diversité de compromis Pareto-optimaux qui ne sont pas nécessairement intuitives. L'usage de métamodèles a permis de visiter un nombre de points de l'espace des solutions important et d'obtenir une quantité de solutions élevée pour une durée de calcul acceptable (7h pour un paramètre de constriction $\varphi=4,1$; 500 particules et 1000 itérations). La discussion et l'analyse des résultats obtenus peuvent être source de multiples sujets d'échanges entre les différents acteurs de la construction. L'usage dynamique d'une représentation par coordonnées parallèles est un outil puissant et pédagogique permettant de sélectionner rapidement des solutions optimales correspondant à la volonté des différents acteurs.

La méthodologie développée nécessite d'intégrer l'ensemble des disciplines considérées dans la réflexion sur le choix des objectifs, la sélection des variables et la modélisation des fonctions-objectif. Dès la formulation du problème, il est alors nécessaire de réaliser un travail de communication entre les différents acteurs. En effet cette méthodologie peut être utilisée en tant que support global à l'ingénierie simultanée (ou conception intégrée) qui permet de considérer en même temps l'influence de plusieurs variables de conception sur un ensemble d'objectifs issus de disciplines différentes. Enfin, une telle méthode est totalement adaptée à l'usage d'une maquette numérique du bâtiment (BIM) qui constitue à la fois un processus de gestion et de production de données, un modèle unique du bâtiment et une plateforme logiciel.

Perspectives

De nombreuses perspectives à ces travaux peuvent être listées pour les contributions à venir. La prise en compte d'objectif d'acoustique et d'éclairage, l'amélioration de la construction des métamodèles, l'optimisation en milieu incertain, la comparaison de l'algorithme PSO avec d'autres algorithmes d'optimisation pour la conception de bâtiment structure bois multiétage, l'étude et la mise en œuvre d'une méthode d'analyse multicritère pour aider au choix de la solution optimale à mettre en œuvre et le développement d'un outil satisfaisant avec une interface utilisateur conviviale sont autant de champs laissés largement ouverts dans ces travaux.

Dans ces travaux, une méthode d'optimisation multiobjectif de bâtiments bois multiétages en phase de conception a été proposée. Cependant l'application de cette méthode est restée limitée à un seul cas d'étude. Il est alors nécessaire d'étendre l'application de la méthode développée à des cas d'étude situés dans plusieurs zones climatiques, avec différents types d'usage (tertiaire, résidentiel...) et hauteurs de bâtiments. Des recherches complémentaires pourront être menées pour étendre cette méthode à d'autres cas d'étude, d'autres modes constructifs et d'autres aspects de la performance des bâtiments. Le type et nombre de variables à optimiser pourraient varier ainsi que le choix des objectifs pertinents. L'ajout d'objectifs relatifs aux performances acoustiques et à l'éclairage naturel peuvent par exemple compléter l'optimisation de systèmes constructifs bois. En acoustique, l'explicitation des liens entre variables et objectif nécessite le développement de modèles numériques de prédiction qui pourraient nécessiter des expérimentations pour fixer les paramètres. Pour l'éclairage naturel, tout comme pour les objectifs de thermique, des métamodèles peuvent être construits. Cela nécessite la prise en main de nouveaux outils de modélisation numérique. Néanmoins, l'ajout de nouvelles fonctions-objectif peut faire apparaître des difficultés d'optimisation.

L'amélioration des métamodèles peut être faite en réduisant la taille de l'échantillon de construction et en considérant des lois de distribution compatibles avec des variables discrètes ou qualitatives nominales telles que le type de plancher. Bien que la précision des métamodèles obtenus soit suffisante, le nombre d'évaluations nécessaire pour leur élaboration peut être réduit. Se pose alors la question de la précision minimum requise. D'autres techniques de construction de métamodèle peuvent également être testées et comparées à la méthode des polynômes du chaos.

Des études d'analyse d'incertitude permettraient notamment de renforcer la robustesse des conclusions sur l'étude de cas tant en terme de performances que de nature des solutions. L'optimisation en milieu incertain nécessite le recours à des méthodes de propagation d'incertitude.

L'algorithme d'optimisation par essaim particulaire n'est pas l'unique algorithme compatible avec les spécificités du problème étudié dans ces travaux. Plus complexe, le NSGA-II a été utilisé dans d'autres travaux ayant des spécificités similaires. Une étude comparative entre ces deux méthodes d'optimisation pourrait être envisagée.

Se pose également la question du choix d'une solution parmi l'ensemble des compromis au sens de Pareto obtenu à l'issue de l'optimisation. Une méthode d'analyse multicritère par surclassement de synthèse reste alors à développer et à appliquer pour l'aide au choix d'une solution correspondant à un contexte donné. Des critères économiques et de faisabilité industrielle doivent alors être traités. Ce champ a déjà été en partie traité par les travaux de Frenette (2009) pour le choix de murs à ossature bois ou encore ceux de Mussier (1998), mais nécessite d'être mis à jour en considérant les outils de calculs actuels. Par exemple, dans ces deux travaux, la performance thermique de l'enveloppe a été étudiée à l'échelle de la paroi en évaluant notamment la résistance thermique, mais nécessite d'être étudiée à l'échelle du bâtiment en évaluant par exemple les besoins de chauffage et le confort thermique.

Enfin, un outil a été développé dans le langage Python pour réaliser les métamodèles et l'optimisation. Cet outil est un prototype, certes opérationnel, mais non adapté pour l'utilisation en bureau d'étude et pour des cas réels plus complexes. Un manque d'ergonomie du fait de l'absence d'une interface utilisateur l'empêche d'être un outil satisfaisant. Un autre outil plus ergonomique a également été envisagé dans ces travaux de thèse. Il s'agit de l'outil TED© développé par l'INRA et dédié à l'optimisation multiobjectif. Bien qu'ergonomique cet outil comporte quelques problèmes de lenteur lorsque les métamodèles (fonctions polynomiales) y sont intégrés. Ainsi, plusieurs jours de calculs sont nécessaires pour effectuer l'optimisation avec l'outil TED© (pour $IT=1000$, $\mu=500$ et $\varphi=4,1$) alors que l'outil développé sous python a requis 7h. Il s'agit donc de développer un nouvel outil qui soit un compromis entre l'outil ergonomique TED© et l'outil développé sous python qui puisse prendre en charge les métamodèles directement issus de la bibliothèque d'OPENTURNS©.

Il a été constaté que pour un bâtiment de quatre niveaux, les systèmes à ossature bois composent les trois-quarts des compromis Pareto-optimaux. Ce constat apporte des perspectives industrielles intéressantes quant aux développements de nouveaux systèmes constructifs bois. En effet, lorsque le nombre de niveaux augmente, les limites de résistances aux charges des systèmes constructifs à ossature bois finissent par être atteintes. Les systèmes constructifs bois utilisant des panneaux CLT peuvent quant à eux être soumis à des contraintes de charges plus importantes. En contrepartie, ces systèmes n'ont pas un recours au bois parcimonieux et sont généralement surdimensionnés vis-à-vis de la reprise des charges. Le développement de solutions innovantes doit alors être envisagé. C'est par exemple l'objectif de l'axe 2 du projet BOIS5+ qui vise le développement d'une solution travaillant avec un panneau de bois en voile mince (panneau CLT ou lamifié) et renforcé par des montants verticaux contre les risques de flambement. D'autres innovations peuvent être envisagées pour

les systèmes constructifs à ossature bois comme l'utilisation de lisses basses ayant une résistance à la compression perpendiculaire plus importante que les résineux comme c'est le cas du béton ou alors de certaines essences de bois feuillus.

Enfin, une dernière perspective à ces travaux est d'étendre la méthodologie développée à des bâtiments de grande hauteur pour lesquels d'autres objectifs, mécaniques, doivent être considérés. Il s'agit alors d'obtenir une méthode adaptée aux ambitions du plan national d'action pour l'avenir des industries de transformation du bois de la Nouvelle France Industrielle. Ce plan porté par la filière Bois via la structure ADIVbois vise la réalisation de bâtiments de grande hauteur en bois avec comme objectif la construction de cinq à dix immeubles de taille moyenne (10 à 15 étages) d'ici 2017 (dont un sur Bordeaux) et la construction d'immeubles bois de plus de 15 étages d'ici 2030.

Références

Cette thèse renvoie à 232 références listées ci-dessous.

Abrahamsen RB, Malo KA (2014) Structural design and assembly of “treet” - a 14-storey timber residential building in norway. In: World Conference on Timber Engineering.

ADEME (2013) Bâtiment - Chiffres clés.

AFNOR (2005a) Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-2 : Généralités - Calcul des structures au feu-F EN 1995-1-2.

AFNOR (2008a) Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Règles communes et règles pour les bâtiments - NF EN 1995-1-1.

AFNOR (2005b) Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments - NF EN 1998-1. 56–56.

AFNOR (2007a) Critères d’ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique - NF EN 15251.

AFNOR (2005c) Ergonomie des ambiances thermiques — Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local - NF EN ISO 7730.

AFNOR (2010a) Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Généralités — Règles communes et règles pour les bâtiments-Annexe Nationale -NF EN 1995-1-1 / NA.

AFNOR (2008b) Classement au feu des produits et éléments de construction - Partie 1 : classement à partir des données d’essais de réaction au feu -NF EN 13501-1+A1 Février 2013.

AFNOR (2012) Contribution des ouvrages de construction au développement durable. Déclarations environnementales sur les produits. Règles régissant les catégories de produits de construction. NF EN 15804.

AFNOR (2008c) NF EN ISO 10211 Avril 2008 - Ponts thermiques dans les bâtiments - Flux thermiques et températures superficielles - Calculs détaillés.

AFNOR (2004a) Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction.

AFNOR (2004b) Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 1.3 : Charges de neige - NF EN 1991-1-3.

AFNOR (2010b) Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 1-4 : Actions du vent - Amendement A1 - NF EN 1991-1-4.

AFNOR (2004c) DTU 51.3 : Planchers en bois ou en panneaux à base de bois - Partie 1.1 : Cahier des clauses techniques - NF P63-203-1-1.

- AFNOR (2007b) Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 1-3 : Charges de neige - Annexe nationale Amendement A1 - NF EN 1991-1-3/NA.
- AFNOR (2008d) Eurocode 1 : Actions sur les structure - Partie 1.4 : Actions du vent - Annexe nationale Amendement A1 et A2 - NF EN 1991-1-4/NA.
- AFNOR (2007c) Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois -NF EN 335.
- Alvarez-Benitez JE, Everson RM, Fieldsend JE (2005) A MOPSO Algorithm Based Exclusively on Pareto Dominance Concepts. *Evol Multi-Criterion Optim* 3410:459–473. doi: 10.1007/978-3-540-31880-4_32
- Antipova E, Boer D, Guillén-Gosálbez G, et al (2014) Multi-Objective Optimization coupled with Life Cycle Assessment for Retrofitting Buildings. *Energy Build* 82:92–99. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.001
- Aparicio Ruiz P, Guadix Martín J, Salmerón Lissén JM, Sánchez de la Flor FJ (2014) An integrated optimisation method for residential building design: A case study in Spain. *Energy Build* 80:158–168. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.020
- Armand-Decker S, Abadie C (2015) Le bois au cœur du concours Solar Décathlon. In: Conférence des bois - Xylofutur - Bordeaux Sciences Agro.
- Armand-Decker S, Bodennec J, Lagièrre P, Bruneau D (2011a) An energy-plus-house strategy applied on a Solar Decathlon House : Napevomo. In: *Energy Forum*.
- Armand-Decker S, Bruneau D, Lagièrre P, Lopez J (2011b) New passive solutions for summer comfort and timber housing in French Atlantic climate. In: Baugmärten C, Theumer M, Adam L, et al. (eds) 15TH International Passive House conference. Innsbruck, pp 171–176
- Armand-Decker S, Lagièrre P (2012) De la conception au retour d'expérience de maisons passives en pin maritime. In: BATSALÉ J, AZAIEZ M (eds) Congrès français de thermique. Bordeaux, pp 348–355
- Armand-Decker S, Lagièrre P, Pauly M (2013) Chapitre 18- Construction bois basse consommation: de la conception à la validation de solutions efficaces pour la thermique d'été. In: *Manuel de l'ingénierie bois*, Eyrolles. pp 419–432
- Attia S, Hamdy M, O'Brien W, Carlucci S (2013) Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. *Energy Build* 60:110–124. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.01.016
- Axaopoulos P, Panagakis P, Axaopoulos I (2014) Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness of a growing-finishing piggery building. *Energy Build* 84:403–411. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.091
- Baglivo C, Congedo PM, Fazio A, Laforgia D (2014) Multi-objective optimization analysis for high efficiency external walls of zero energy buildings (ZEB) in the Mediterranean climate. *Energy Build* 84:483–492. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.08.043

-
- Balanant N, Guigou C, Villenave M (2014) Respect des exigences acoustiques dans les bâtiments d'habitation à ossature bois-Etape 2 et 3- Méthode simplifiée et exemples de solutions acoustiques. Qual CSTB FCBA 30–32.
- Baldock R, Shea K (2006) Structural topology optimization of braced steel frameworks using genetic programming. In: Intelligent Computing in Engineering and Architecture. pp 54–61
- Bayne K, Taylor S (2006) Attitudes to the use of Wood as a Structural Material in Non-residential Building Applications: Opportunities for Growth.
- Benoit Y, Paradis T (2014) Construction de maisons à ossature bois.
- Bitam M, Belarbi M (2006) Contribution à l'optimisation de la conception globale en construction métallique. *Courr. du Savoir* 19–35.
- Blengini GA, Di Carlo T (2010) The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy Build* 42:869–880. doi: 10.1016/j.enbuild.2009.12.009
- Bocquet J-F (2009) Guide Eurocode : Justification des planchers bois résidentiels.
- Boeringer D, Werner D (2004) Particle Swarm Optimization Versus Genetic Algorithms for Phased Array Synthesis. *IEEE Trans Antennas Propag* 52:771–779. doi: 10.1109/TAP.2004.825102
- bois.com (2005) Une forêt diversifiée, en constante progression-Interview de Claude Vidal, Directeur de l'inventaire forestier national. In: Le site référence pour tout savoir sur le bois. <http://www.bois.com/environnement/role-foret/foret-diversifiee>.
- Börjesson P, Gustavsson L (2000) Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. *Energy Policy* 28:575–588.
- Boulet S (2009) Caractérisation du confort hygrothermique et acoustique dans les constructions à base de bois. Université de Savoie
- Bourdin D (2013) Composés organiques volatils émis par les matériaux de construction : impact sur la qualité de l'air intérieur. École doctorale Sciences exactes et leurs applications. UFR Sciences et Techniques (Pau)
- BRE (2004) Barriers to the enhanced use of wood in Europe: Particular attention to the regulatory barriers.
- Bruneau D, Lagière P, Armand S, et al (2010) Analyse des conditions de confort d'un bâtiment solaire à énergie positive : la maison « Napevomo » au Solar Decathlon Europe 2010. In: CFSEER. Damas,
- Buchanan AH, John S, Love S (2012) LCA and carbon footprint of multi-storey timber buildings compared with steel and concrete buildings. In: World Conference on Timber Engineering.
- Černý V (1985) Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *J Optim Theory Appl* 45:41–51. doi: 10.1007/BF00940812
- CERTIVEA (2011) Référentiel pour la qualité environnementale des bâtiments HQE – bâtiments tertiaires.

-
- Chantrelle FP, Lahmidi H, Keilholz W, et al (2011) Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. *Appl Energy* 88:1386–1394. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.10.002
- Chlela F (2008) Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. Université de La Rochelle
- Chlela F, Husaunndee A, Inard C, Riederer P (2009) A new methodology for the design of low energy buildings. *Energy Build* 41:982–990. doi: 10.1016/j.enbuild.2009.05.001
- Clarke J, McLay L, McLeskey JT (2014) Comparison of genetic algorithm to particle swarm for constrained simulation-based optimization of a geothermal power plant. *Adv Eng Informatics* 28:81–90. doi: 10.1016/j.aei.2013.12.003
- Clerc M (2014) Chapitre 7 - Les essais particuliers. In: Eyrolles (ed) Métaheuristiques - Recuits simulé, recherche avec tabous, recherche à voisinages variables, méthodes GRASP, algorithmes évolutionnaires, fourmis artificielles, essais particuliers et autres méthodes d'optimisation. pp 199–221
- Clerc M (1999) The swarm and the queen: Towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization. *Proc 1999 Congr Evol Comput CEC 1999* 3:1951–1957. doi: 10.1109/CEC.1999.785513
- CNDB (2012) Les obstacles au développement de l'utilisation du bois dans la construction et propositions d'actions.
- Colette Y, Siarry P (2002) Optimisation multiobjectif.
- Coloni A, Dorigo M, Maniezzo V (1991) Distributed Optimization by Ant Colonies. *Proc Eur Conf Artif Life* 134–142.
- Commission Européenne (2011) Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions - Feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources.
- Cornillier C, Vial E (2008) L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) appliquée aux produits bois: bilan énergétique et prise en compte du carbone biomasse. In: IXème colloque Sciences et Industrie du Bois-20 &.
- Crawley D, Hand J, Kummert M, Griffith B (2008) Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs.
- Crestaux T, Le Maître O, Martinez J-M (2009) Polynomial chaos expansion for sensitivity analysis. *Reliab Eng Syst Saf* 94:1161–1172. doi: 10.1016/j.ress.2008.10.008
- D.Xiu, Karniadakis GE, Xiu D (2002) The Wiener-Askey polynomial chaos for stochastic differential equations. *SIAM J Sci Comput* 24:619–644 (electronic).
- D'Cruz N a., Radford AD (1987) A multicriteria model for building performance and design. *Build Environ* 22:167–179. doi: 10.1016/0360-1323(87)90005-9

-
- D'Ocagne M (1885) Coordonnées parallèles et axiales: Méthode de transformation géométrique et procédé nouveau de calcul graphique déduits de la considération des coordonnées parallèles, Cornell Un.
- Darwin C (1859) On the Origins of species by means of Natural Selection.
- De Dear R, Brager G (1998) Developing an adaptive model of thermal comfort and preference.
- Deb K (2000) An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Comput Methods Appl Mech Eng* 186:311–338. doi: 10.1016/S0045-7825(99)00389-8
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T (2002) A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evol Comput* 6:182–197. doi: 10.1109/4235.996017
- Delaplace A, Gatuingt F, Ragueneau F (2008) Aide mémoire RDM.
- Delestrac D (2013) Le sable - Enquête sur une disparition.
- Denormandie L, Charmasson L (2013) Enquête nationale de la construction bois-Activité 2012-. Fr. bois Forêt - Codif.
- Di Perna C, Stazi F, Casalena a. U, D'Orazio M (2011) Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads. *Energy Build* 43:200–206. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.09.007
- Directive 2010/31/UE (2010) Directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments (refonte). *J Off l'Union Eur* 13–35.
- Dodoo A, Gustavsson L, Sathre R (2009) Carbon implications of end-of-life management of building materials. *Resour Conserv Recycl* 53:276–286. doi: 10.1016/j.resconrec.2008.12.007
- Dutka-Malen I, Lebrun R, Saassouh B, Sudret B (2009) Implementation of a polynomial chaos toolbox in OpenTURNS and applications to structural reliability and sensitivity analyses. In: The 10th International Conference on Structural Safety and Reliability ICOSSAR 2009. Osaka, Japon,
- Eberhart R, Kennedy J (1995) A new optimizer using particle swarm theory. In: MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. IEEE, pp 39–43
- Eberhart R, Shi Y (1998) Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. In: *Evolutionary Programming VII*.
- EERE (2015) Building Technologies Office: Building Energy Software Tools Directory. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/. Accessed 7 Jun 2015
- Eisenhower B, O'Neill Z, Narayanan S, et al (2012) A methodology for meta-model based optimization in building energy models. *Energy Build* 47:292–301. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.12.001
- Elbeltagi E, Hegazy T, Grierson D (2005) Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms. *Adv Eng Informatics* 19:43–53. doi: 10.1016/j.aei.2005.01.004
- Eric Brunelle (2008) Notes de cours : Méthodes Quantitatives-Chapitre 2 Les variables. <http://e Brunelle.profweb.ca/MQ/MQ.htm>. Accessed 17 Jul 2015

- Evins R (2013) A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renew Sustain Energy Rev* 22:230–245. doi: 10.1016/j.rser.2013.02.004
- Fanger PO (1970) *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.* Copenhagen: Danish Technical Press.
- FCBA (2014) *Mémento 2014.*
- FCBA, CSTB (2009) *Developpement de l'usage du bois dans la construction : Obstacles Réglementaires & Normatifs Bois Construction.*
- Fesanghary M, Asadi S, Geem ZW (2012) Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm. *Build Environ* 49:245–250. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.09.030
- Flager F, Haymaker J (2007) A comparison of multidisciplinary design, analysis and optimization processes in the building construction and aerospace industries. In: 24th international conference on information technology in construction. Maribor, Slovenia,
- Flager F, Soremekun G, Adya A, et al (2011) Fully Constrained Design: a Scalable Method for Discrete Member Sizing Optimization of Steel Frame Structures. Stanford
- Flager F, Welle B, Bansal P, et al (2009) Multidisciplinary Process Integration & Design Optimization of a Classroom Building. Stanford
- Fleury E, Chiche M (2004) *Le Bois dans la construction. Etude bibliographique.* CSTB 81.
- Fogel LJ, Owens AJ, Walsh MJ (1997) *Artificial Intelligence through Simulated Evolution.* Wiley 27–38. doi: citeulike-article-id:431795
- Fontan M (2011) Identification de paramètres par analyse inverse à l'aide d'un algorithme méta-heuristique : Applications à l'interaction sol structure, à la caractérisation de défauts et à l'optimisation de la métrologie. Université de Bordeaux I
- Foucquier A, Robert S, Suard F, et al (2013) State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 23:272–288. doi: 10.1016/j.rser.2013.03.004
- FPInnovations (2011) *Manuel CLT.*
- FPInnovations (2014) *Guide technique pour la conception et la construction de bâtiments en bois de grande hauteur au Canada.*
- Frenette C (2009) *Analyse multicritère des compositions de mur à ossature légère en bois.* Université Laval
- Frenette C, Bulle C, Beauregard R (2010) Defining an environmental index to compare light-frame wood wall assemblies using life-cycle assessment.
- Fruehwald A, Knauf M (2014) Carbon aspects promote building with wood. In: World conference on Timber Engineering.

-
- Garnesson T (2014) Mémoire de fin d'études. Méthode d'optimisation multi-objectif dédiée aux bâtiments bois multi-étages Objectifs et contraintes mécaniques. Nobatek
- Gero J, D'Cruz N, Radford A (1983) Energy in context: a multicriteria model for building design. *Build Environ* 18:99–107.
- Geyer P (2009) Component-oriented decomposition for multidisciplinary design optimization in building design. *Adv Eng Informatics* 23:12–31. doi: 10.1016/j.aei.2008.06.008
- Gholizadeh S, Fattahi F (2012) Design optimization of tall steel buildings by a modified particle swarm algorithm. *Struct Des Tall Spec Build*. doi: 10.1002/tal.1042
- Glover F (1986) Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Comput Oper Res* 13:533–549. doi: 10.1016/0305-0548(86)90048-1
- Gobin C (2003) Analyse fonctionnelle et construction [c3052].
- Goldberg DE (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*.
- Gossard D, Lartigue B, Thellier F (2013) Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic algorithms and artificial neural network. *Energy Build* 67:253–260. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.026
- Green M (2012) The case for tall wood buildings.
- Grenelle Environnement (2010) *Le Grenelle Environnement*.
- Hamdy M (2012) *Combining Simulation and Optimisation for Dimensioning Optimal Building Envelopes and HVAC Systems*. Aalto University
- Hamm P, Richter A, Winter S (2010) Floor vibrations – new results. In: *World Conference on Timber Engineering*.
- Hemström K, Mahapatra K, Gustavsson L (2011) Perceptions, attitudes and interest of Swedish architects towards the use of wood frames in multi-storey buildings. *Resour Conserv Recycl* 55:1013–1021. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.05.012
- Hengxi LIU (2006) *Corrélation entre perception au confort vibratoire et comportement dynamique de planchers bois: apport pour le dimensionnement*.
- Héran F (2001) La réduction de la dépendance automobile. *Cah Lillois d'Economie Sociol* n°37:61–86.
- Hisao Ishibuchi, Noritaka Tsukamoto, Yusuke Nojima (2008) Evolutionary many-objective optimization: A short review. In: *IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*. IEEE, pp 2419–2426
- Hoeffding W (1948) A class of statistics with asymptotically normal distribution.
- Holland JM (1992) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*.
- Homma T, Saltelli A (1996) Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models.
- Hong T, Chou S., Bong T. (2000) Building simulation: an overview of developments and information sources. *Build Environ* 35:347–361. doi: 10.1016/S0360-1323(99)00023-2

- Horn J (1996) *Multicriteria Decision Making and Evolutionary Computation*.
- Hu LJ, Chui YH (2004) Development of a design method to control vibrations induced by normal walking action in wood-based floors.
- Hu X, Eberhart R (2002) Solving Constrained Nonlinear Optimization Problems with Particle Swarm Optimization. In: *Proceedings of the sixth world multiconference on systemics, cybernetics and informatics*.
- Hu X, Eberhart RC, Shi Y (2003) Particle swarm with extended memory for multiobjective optimization. In: *IEEE Swarm Intelligence Symposium*. IEEE, pp 193–197
- Iceb (2012) *L'énergie grise des matériaux et des ouvrages*.
- Inies (2015) Base nationale française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires des produits, équipements et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages. <http://www.base-inies.fr/Inies/default.aspx>. Accessed 8 Jun 2015
- INSEE (2010) Mises en chantier de logements neufs en habitat collectif ou individuel en 2010 dans Industrie-IAA-Construction.
- Iooss B (2011) Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques. *J la Société Française Stat* 1–23.
- Irulegi O, Torres L, Serra A, et al (2014) The Ekihouse: An energy self-sufficient house based on passive design strategies. *Energy Build* 83:57–69. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.077
- Jaakko Pöyry Consulting (2004) Key Findings and Conclusions Market , Industry & Forest Resource Analysis as part of the Roadmap to 2010 Process.
- Jin R, Chen W, Simpson TW (2001) Comparative Studies of Metamodeling Techniques Under Multiple Modeling Criteria. *Struct Multidiscip Optim* 23:1–13. doi: 10.2514/6.2000-4801
- Jöbstl R, Schickhofer G (2007) Comparative examination of creep of GTL and CLT slabs in bending.
- Kennedy J, Eberhart R (1997) A discrete binary version of the particle swarm algorithm. In: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. IEEE, pp 4104–4108
- Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP (1982) Optimization by simulated annealing.
- Kouyoumji J-L (2013) Chapitre 24-Acoustique des constructions bois. In: *Manuel de l'ingénierie bois*, Eyrolles. pp 501–536
- Kusiak A, Xu G, Tang F (2011) Optimization of an HVAC system with a strength multi-objective particle-swarm algorithm. *Energy* 36:5935–5943. doi: 10.1016/j.energy.2011.08.024
- La Roche P, Milne M (2004) Effects of window size and thermal mass on building comfort using an intelligent ventilation controller. *Sol Energy* 77:421–434. doi: 10.1016/j.solener.2003.09.004
- Larousse (2015) *Dictionnaire Larousse en ligne*.
- Lehmann S (2012) Sustainable Construction for Urban Infill Development Using Engineered Massive Wood Panel Systems. *Sustainability* 4:2707–2742. doi: 10.3390/su4102707

-
- Levin H (1991) Critical Building Design Factors for Indoor Air Quality and Climate : Current Status and Predicted Trends. Danish Tech Press Indoor Air:79–92.
- Lin S-H, Gerber DJ (2014) Evolutionary energy performance feedback for design: Multidisciplinary design optimization and performance boundaries for design decision support. *Energy Build* 84:426–441. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.08.034
- Loubens A (2012) En 30 ans, les villes accueilleront trois fois plus de gens. In: Tech. l'Ingénieur. http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/environnement-thematique_191/en-30-ans-les-villes-accueilleront-trois-fois-plus-de-gens-article_75813/. Accessed 8 Jul 2015
- Lourenço HR, Martin O, Stützle T (2001) A beginner's introduction to Iterated Local Search. *Proceeding 4th Metaheuristics Int Conf* 4–11.
- Maamari F (2004) La simulation numérique de l'éclairage, limites et potentialités.
- Machairas V, Tsangrassoulis A, Axarli K (2014) Algorithms for optimization of building design: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 31:101–112. doi: 10.1016/j.rser.2013.11.036
- Magnier L, Haghghat F (2010) Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Build Environ* 45:739–746. doi: 10.1016/j.buildenv.2009.08.016
- Mahapatra K, Gustavsson L (2009) General conditions for construction of multi-storey wooden buildings in Western Europe.
- Marks W (1997) Multicriteria optimisation of shape of energy-saving buildings. *Build Environ* 32:331–339. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00065-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00065-0)
- MEEDDM (2010) Arrêté 26/10/2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de, bâtiments (RT 2012).
- Mela K, Tiainen T, Heinisuo M (2012) Comparative study of multiple criteria decision making methods for building design. *Adv Eng Informatics* 26:716–726. doi: 10.1016/j.aei.2012.03.001
- Merheb R (2013) Fiabilité des outils de prévision du comportement des systèmes thermiques complexes. Université de Bordeaux I
- MESR (2013) Guide énergie-carbone pour le patrimoine immobilier universitaire.
- Mestek P, Winter S, Kreuzinger H (2008) Design of Cross Laminated Timber (CLT).
- Metropolis N, Rosenbluth AW, Rosenbluth MN, et al (1953) Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *J Chem Phys* 21:1087–1092. doi: doi:10.1063/1.1699114
- Michaud F, Castera P, Fernandez C, Ndiaye A (2009) Meta-heuristic Methods Applied to the Design of Wood--Plastic Composites, with Some Attention to Environmental Aspects. *J Compos Mater* 43:533–548. doi: 10.1177/0021998308097681
- Michel J, Toppan E (2012) Observatoire économique de France Bois Forêt. *Fr. Bois Forêt*

- Minssart Y (2008) Le bois prend de la hauteur. *Ecologik* 8:44–53.
- Mladenović N, Hansen P (1997) Variable neighborhood search. *Comput Oper Res* 24:1097–1100. doi: 10.1016/S0305-0548(97)00031-2
- Monmarché N (2014) Chapitre 6 - Les fourmis artificielles. In: Eyrolles (ed) *Métaheuristiques - Recuits simulé, recherche avec tabous, recherche à voisinages variables, méthodes GRASP, algorithmes évolutionnaires, fourmis artificielles, essais particuliers et autres méthodes d'optimisation*. pp 175–197
- Morris MD (1991) Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics* 33:161. doi: 10.2307/1269043
- Mussier L (1998) *Elaboration d'un système d'aide au choix de solutions constructives bois pour les phases précoces de conception*. Université de Savoie
- Nabil A, Mardaljevic J (2006) Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy Build* 38:905–913. doi: 10.1016/j.enbuild.2006.03.013
- Naboni E, Zhang Y, Maccarini A, et al (2013) Extending the use of parametric simulation in practice through a cloud based online service. *Proc first IBPSA-Italy Conf BSA 2013* 105–112.
- Ndiaye A, Castéra P, Fernandez C, Michaud F (2009) Multi-objective preliminary ecodesign. *Int J Interact Des Manuf* 3:237–245. doi: 10.1007/s12008-009-0080-x
- Nguyen AT, Reiter S (2014) Passive designs and strategies for low-cost housing using simulation-based optimization and different thermal comfort criteria. *J Build Perform Simul* 7:68–81. doi: 10.1080/19401493.2013.770067
- Nguyen A-T, Reiter S, Rigo P (2014) A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Appl Energy* 113:1043–1058. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.061
- Nouvelle France Industrielle (2013) *Plan national d'action pour l'avenir des industries de transformation du bois*.
- Pacheco R, Ordóñez J, Martínez G (2012) Energy efficient design of building: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 16:3559–3573. doi: 10.1016/j.rser.2012.03.045
- Pataky R, Áts Á, Áts-leskó Z, Birtalan O (2014) Constructional considerations for the mobile Plus-Energy House. *Energy Build* 83:195–208. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.015
- Pétrowski A, Sana Ben Hamida (2014) Chapitre 5 - Les algorithmes évolutionnaires. In: Eyrolles (ed) *Métaheuristiques - Recuits simulé, recherche avec tabous, recherche à voisinages variables, méthodes GRASP, algorithmes évolutionnaires, fourmis artificielles, essais particuliers et autres méthodes d'optimisation*. pp 115–173
- PIPAME, ALCIMED (2012) *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020*.
- Plevris V, Papadrakakis M (2010) A Hybrid Particle Swarm-Gradient Algorithm for Global Structural Optimization. *Comput Civ Infrastruct Eng* 26:48–68. doi: 10.1111/j.1467-8667.2010.00664.x

-
- Poggi P (2014) Construire IGH et tours en bois (1/2) : des réalisations ambitieuses. Le Monit.
- Quaglia CP, Yu N, Thrall a. P, Paolucci S (2014) Balancing energy efficiency and structural performance through multi-objective shape optimization: Case study of a rapidly deployable origami-inspired shelter. *Energy Build* 82:733–745. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.063
- Rabouille M (2014) Recherche de la performance en simulation thermique dynamique : Application à la réhabilitation des bâtiments.
- Radford AD, Gero JS (1980) Tradeoff diagrams for the integrated design of the physical environment in buildings. *Build Environ* 15:3–15. doi: 10.1016/0360-1323(80)90024-4
- Ramesh T, Prakash R, Shukla KK (2010) Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy Build* 42:1592–1600. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.007
- Rapone G, Saro O (2012) Optimisation of curtain wall façades for office buildings by means of PSO algorithm. *Energy Build* 45:189–196. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.11.003
- Rechenberg I (1965) Cybernetic solution path of an experimental problem. *R Aircr Establ Libr Transl Journal of Theoretical Biology*, 215:441–448.,.
- Recht T, Munaretto F, Schalbart P, Peuportier B (2014) Analyse de la fiabilité de COMFIE par comparaison à des mesures. Application à un bâtiment passif. In: IBPSA.
- République française (1993) Décret n°93-1268 du 29 novembre 1993 relatif aux missions de maîtrise d'oeuvre confiées par des maîtres d'ouvrage publics à des prestataires de droit privé.
- République Française (1982) Arrêté du 24 mars 1982 (urbanisme et logement, énergie, santé) modifié par arrêté du 28 octobre 1983 - dispositions relatives à l'aération des logements, Paris, 1982.
- Reyes-Sierra M, Coello Coello C a. (2006) Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art. *Int J Comput Intell Res* 2:287–308. doi: 10.5019/j.ijcir.2006.68
- Rhomberg H (2012) CREE - The Natural Change in Urban Architecture: LifeCycle Tower.
- Riala M, Ilola L (2014) Multi-storey timber construction and bioeconomy – barriers and opportunities. *Scand J For Res* 29:367–377. doi: 10.1080/02827581.2014.926980
- Rivallain M (2013) Etude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants.
- Rogers Z, Goldman D (2006) Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool.
- Rouault F, Bruneau D, Sébastien P, Lopez J (2014) Experimental investigation and modelling of a low temperature PCM thermal energy exchange and storage system. *Energy Build* 83:96–107. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.026
- Roy R, Hinduja S, Teti R (2008) Recent advances in engineering design optimisation: Challenges and future trends. *CIRP Ann - Manuf Technol* 57:697–715. doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.007

- Saltelli A, Annoni P (2010) How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. *Environ Model Softw* 25:1508–1517. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.04.012
- Sambou V, Lartigue B, Monchoux F, Adj M (2009) Thermal optimization of multilayered walls using genetic algorithms. *Energy Build* 41:1031–1036. doi: 10.1016/j.enbuild.2009.05.007
- Sana Ben Hamida (2014) Chapitre 11 - Extensions des algorithmes évolutionnaires à l'optimisation sous contraintes. In: Eyrolles (ed) *Métaheuristiques - Recuits simulé, recherche avec tabous, recherche à voisinages variables, méthodes GRASP, algorithmes évolutionnaires, fourmis artificielles, essais particuliers et autres méthodes d'optimisation*.
- Schoenauer M, Xanthakis S (1993) Constrained GA optimization. In: 5th International conference on Genetic Algorithms.
- Sempey A, Guiavarch A, Bruneau D, et al (2009) Intégration d'un modèle simplifié de matériau hygroscopique dans une plate-forme d'aide à la conception énergétique de bâtiments : application aux parois bois massives. In: CIFIQ 2009.
- Serra Soriano B, Gimeno PV, Segura a. D, de la Maza RM (2014) Assembling sustainable ideas: The construction process of the proposal SMLsystem at the Solar Decathlon Europe 2012. *Energy Build* 83:186–194. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.075
- Seve J-C, Söderlind J (2006) Construire en bois, un choix durable. Les essentiels du Bois
- Sharafi M, ELMekkawy TY (2014) Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach. *Renew Energy* 68:67–79. doi: 10.1016/j.renene.2014.01.011
- Shaviv E, Yezioro A, Capeluto IG (2001) Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renew Energy* 24:445–452. doi: 10.1016/S0960-1481(01)00027-1
- Shea K, Sedgwick A, Antonuntto G (2006) Multicriteria optimization of paneled building envelopes using ant colony optimization. In: Smith IFC (ed) *Intelligent Computing in Engineering and Architecture*. Ascona, pp 627–636
- Siarry P (2014a) Introduction. In: Eyrolles (ed) *Métaheuristiques - Recuits simulé, recherche avec tabous, recherche à voisinages variables, méthodes GRASP, algorithmes évolutionnaires, fourmis artificielles, essais particuliers et autres méthodes d'optimisation*. p 534
- Siarry P (2014b) Chapitre 1- La méthode du recuit simulé. In: Eyrolles (ed) *Métaheuristiques - Recuits simulé, recherche avec tabous, recherche à voisinages variables, méthodes GRASP, algorithmes évolutionnaires, fourmis artificielles, essais particuliers et autres méthodes d'optimisation*. pp 21–49
- Sidler O (2008) Notes techniques et réflexions Les grands enjeux de l'énergie au XXIème siècle. Enerthech
- Skidmore Owings & Merrill LPP (2013) Timber tower research project.

-
- Sobol I (1993) On sensitivity estimation for nonlinear mathematical models. *Math Model Comput Exp* 1:407–414.
- SOes (2015) Chiffres clés du climat - France et Monde.
- Stevanović S (2013) Optimization of passive solar design strategies: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 25:177–196. doi: 10.1016/j.rser.2013.04.028
- Sudret B (2008) Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. *Reliab Eng Syst Saf* 93:964–979. doi: 10.1016/j.ress.2007.04.002
- Taillandier F (2009) La notion de risque comme clef du pilotage d'un parc patrimonial immobilier. Université de Savoie
- Théllier F (1999) Mémoire d'habilitation à diriger des recherches - L'homme et son environnement thermique - modélisation.
- Théllier F, Monchoux F, Endravadan M (2007) Prise en compte du comportement adaptatif de l'être humain dans la simulation thermique de l'habitat. In: *Congrès de la SFT*. p 6
- Tian W (2013) A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 20:411–419. doi: 10.1016/j.rser.2012.12.014
- Tonelli C, Grimaudo M (2014) Timber buildings and thermal inertia: Open scientific problems for summer behavior in Mediterranean climate. *Energy Build* 83:89–95. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.12.063
- Tresidder E, Zhang Y, Forrester A (2012) Acceleration of building design optimisation through the use of kriging surrogate models. In: *Building Simulation and Optimization Conference*. pp 1–8
- Trouy-Triboulot M-C (2012) Perspectives de la préservation des bois de construction. In: *2ème forum bois construction*, Beaune.
- United Nations (2015) *World Population Prospects - The 2015 Revision. Key findings and advance tables*.
- United Nations (2011) *The State of Europe's Forests 2011 Summary for Policy Makers*.
- Valbois (2009) *Le bois et les constructions en hauteur*.
- Van Gelder L, Das P, Janssen H, Roels S (2014) Simulation Modelling Practice and Theory Comparative study of metamodelling techniques in building energy simulation : Guidelines for practitioners. *Stimul Model Pract Theory* 49:245–257. doi: 10.1016/j.simpat.2014.10.004
- Verbeeck G (2007) Optimization of extremely low energy residential buildings. Katholieke Universiteit Leuven
- Walton GN (1989) AIRNET - A Computer Program for Building Airflow Network Modelling.
- Wang L, Toppinen A, Juslin H (2014) Use of wood in green building: A study of expert perspectives from the UK. *J Clean Prod* 65:350–361. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.08.023
- Wang W, Rivard H, Zmeureanu R (2006) Floor shape optimization for green building design. *Adv Eng Informatics* 20:363–378. doi: 10.1016/j.aei.2006.07.001

- Wang W, Rivard H, Zmeureanu RG (2003) Optimizing Building Design With Respect To Life-Cycle Environmental Impacts. In: Eighth International IBPSA Conference. pp 1355–1362
- Wang W, Zmeureanu R, Rivard H (2005) Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Build Environ* 40:1512–1525. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.11.017
- Welle B, Rogers Z, Fischer M (2012) BIM-centric daylight profiler for simulation (BDP4SIM): A methodology for automated product model decomposition and recomposition for climate-based daylighting. Elsevier Ltd, Stanford
- Werner F, Richter K (2007) Wooden building products in comparative LCA. *Int J Life Cycle Assess* 12:470–479. doi: 10.1065/lca2007.04.317
- Wetter M, Wright J (2003) Comparison of a generalized pattern search and a genetic algorithm optimization method. In: IBPSA. Eindhoven, pp 1401–1408
- Wetter M, Wright J (2004) A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization. *Build Environ* 39:989–999. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.01.022
- Wiener N (1938) The homogeneous chaos. *Amer J Math* 60:897–936.
- Wienold J (2009) Dynamic daylight glare evaluation. In: Eleventh International IBPSA Conference: Building Simulation. pp 944–951
- Wolpert DH, Macready WG (1997) No free lunch theorems for optimization. *IEEE Trans Evol Comput* 1:67–82. doi: 10.1109/4235.585893
- Wright J a., Loosemore H a., Farmani R (2002) Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy Build* 34:959–972. doi: 10.1016/S0378-7788(02)00071-3
- Yang R, Wang L (2012) Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control. *Sustain Cities Soc* 2:1–7. doi: 10.1016/j.scs.2011.09.001
- Yiqing L, Xigang Y, Yongjian L (2007) An improved PSO algorithm for solving non-convex NLP/MINLP problems with equality constraints. *Comput Chem Eng* 31:153–162. doi: 10.1016/j.compchemeng.2006.05.016
- Zhao HX, Magoulès F (2012) A review on the prediction of building energy consumption. *Renew Sustain Energy Rev* 16:3586–3592. doi: 10.1016/j.rser.2012.02.049
- Zhou A, Qu B-Y, Li H, et al (2011) Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. *Swarm Evol Comput* 1:32–49. doi: 10.1016/j.swevo.2011.03.001

Annexe A Recensement de bâtiments bois multiétages (cinq niveaux et plus) construits dans le monde de 2003 à 2014.

La liste de bâtiments bois multiétages recensés dans le tableau ci-dessous n'a pas vocation d'exhaustivité mais plutôt de représentativité de l'émergence de bâtiments bois de moyenne hauteur partout dans le monde. Les solutions constructives sont variées. Utilisant des systèmes à ossature bois, des panneaux CLT et des poteaux-poutres de bois lamellé-collé ainsi que des systèmes mixtes avec usage de béton parcimonieux, la construction bois multiétage commence à prendre de l'ampleur et le nombre d'édifications s'accélère.

Tableau 22 : Recensement de bâtiments bois multiétages (cinq à dix niveaux) construits dans le monde de 2003 à 2014

Nom de l'opération	Type	Année	Lieu	Pays	Nombre de niveaux	Solution constructive bois	Usage de béton	Architecte
Earth Science Building (ESB) UBC	Tertiaire	2012	Vancouver	Canada	R+4	Poteau poutre en lamellé-collé pour les murs et panneau CLT pour les planchers et la toiture	Non	Perkins + Will Canada Architects
LCT Two	Tertiaire	2013	Rodund, Montafon	Autriche	R+4	Idem LCT One	Circulations verticales	Hermann Kaufmann
Waterson Street	Résidentiel	2005	Londres	Royaume Unis	R+4	Panneau CLT	Non	Quay2c
Svatlamoen	Résidentiel	2004	Trondheim	Norvège	R+4	Panneau CLT	Non	Brendeland & Kristoffersen architects
Ecoquartier Les Prés	Résidentiel	2012	Angers	France	R+4	Panneau CLT	RDC, refends intérieurs et planchers intermédiaires	Matières d'espaces
Coopérative d'habitation FGZ - Zurich	Résidentiel	2003	Zurich	Suisse	R+4	Ossature bois	Circulations verticales	EM2N
3xGrün	Résidentiel	2011	Berlin	Allemagne	R+4	Ossature bois et panneau CLT	-	Atelier PK

Am Muehlweg	Résidentiel	2005	Vienne	Autriche	R+4	Panneau CLT	RDC	Hubert Riess, Dietrich Untertrifalle et Hermann & Johannes Kaufmann Schwarzach
Fond Action CSN	Tertiaire	2010	Québec	Canada	R+5	Poteau poutre en lamellé-collé	RDC, et circulations verticale	GHA
Wood innovation and design centre	Tertiaire	2014	Prince George	Canada	R+5	CLT et Poteau poutre lamellé collé	Non	Michael Green
Marceau	Résidentiel	2011	Montreuil-sous-bois	France	R+5	Ossature bois	Circulations verticales	GRAAM
Library Square	Résidentiel	2011	KalLoops	Canada	R+5	Ossature bois	RDC et circulations verticales et horizontales	JM Architect
Sitka apartments	Résidentiel	2005	Portland	Etats-Unis	R+5	Ossature bois	RDC	Ankrom Moisan
Apple Valley Residences	Résidentiel	2010	Kelowna	Canada	R+5	Ossature bois	RDC et Circulations verticales	Patrick McCusker
Ramona Apartments	Résidentiel	2011	Portland	Etats-Unis	R+5	Ossature bois	RDC	Ankrom Moisan
Skyline condominiums	Résidentiel	2012	Vancouver	Canada	R+5	Ossature bois	-	Misra architect
Quattro 3	Résidentiel	2012	Surrey	Canada	R+5	Ossature bois	Non	Patrick Cotter Architect
District 03	Résidentiel	2013	Québec	Canada	R+5	Panneau CLT	Non	Éric pelletier architecte
Tamedia	Tertiaire	2013	Zurich	Suisse	R+6	Poteau poutre en lamellé collé avec continuité des poteaux. Structure dépourvue de tout renforcement en acier.	Non	Shigeru Ban
E3	Résidentiel	2008	Berlin	Allemagne	R+6	Poteau poutre, panneau CLT, acier et plancher bois-béton	RDC	Kaden Klingbeil

Annexe A : Recensement de bâtiments bois multiétages (cinq niveaux et plus) construits dans le monde de 2003 à 2014.

Wagramerstrasse	Résidentiel	2012	Vienne	Autriche	R+6	Panneau CLT	RDC	Michael Schluder
Holzhausen	Résidentiel	2006	Steinhausen	Suisse	R+6	Panneau CLT	RDC	Scheitlin, syfrig & Partner Architekten
Thornton Place	Résidentiel	2009	Seattle	Etats-Unis	R+6	Ossature bois	RDC et premiers niveaux	Mithun
Sanctuary Apartments	Résidentiel	2009	Renton	Etats-Unis	R+6	Ossature bois	RDC et premiers niveaux	-
Campus student housing	Résidentiel	2012	Washington	Etats-Unis	R+6	Ossature bois	Non	Mahlum
LCT One	Tertiaire	2012	Dornbirn	Autriche	R+7	Le système porteur est basé sur le principe de la tour LCT de 30 étages (Figure 13). Poteau poutre et plancher mixte bois-béton. La muraille du plancher est en béton et constitue la lisse basse sur laquelle repose les poteaux verticaux.	RDC et Circulations verticales	Hermann Kaufmann
Limnologen	Résidentiel	2009	Vaxjo	Suède	R+7	Murs de séparation porteurs à ossature bois et murs extérieur en panneau CLT. Plancher intermédiaire avec panneau CLT et solives bois.	RDC	ArkitektBolat et
Portvaktén Söder	Résidentiel	2009	Vaxjo	Suède	R+7	Ossature bois	RDC	Bsv
Bridport House	Résidentiel	2010	Londres	Royaume Unis	R+7	Panneau CLT partout même dans les structures des cages d'ascenseurs	Non	Karakusevic Carson Architects
Holz8	Résidentiel	2011	Bad Aibling	Allemagne	R+7	Panneau CLT	Circulations verticales	Schankula architekten
Extension de la maison de l'inde	Résidentiel	2013	Paris	France	R+7	Poteau poutre	RDC et Circulations verticales et horizontales. Utilisation de deux plaques de BA13 pour assurer la résistance au feu.	Agence Lipsky – Rollet
La Jolla Crossroads	Résidentiel	2007	San Diego	Etats-Unis	R+7	Ossature bois	RDC	-

Marseille	Résidentiel	2009	Seattle	Etats-Unis	R+7	Ossature bois	RDC et premiers niveaux	PB Architects
Résidence Jules Ferry	Résidentiel	2014	Saint Dié des Vosges	France	R+7	Ossature bois et Panneau CLT	Non	ASP Architecture
Strandparken	Résidentiel	2013	Stockholm	Suède	R+7	Panneau CLT	Non	Wingårdhs
Stadthaus	Résidentiel	2008	Londres	Royaume Unis	R+8	Panneau CLT	RDC	Waugh Thistleton Architects
Via Cenni	Résidentiel	2013	Milan	Italie	R+8	Panneau CLT. Dimension des panneaux CLT variables selon l'étage. Conception parasismique.	Non	Fabrizio Rossi Prodi
Stella	Résidentiel	2013	Marina del Rey	Canada	R+8	Ossature Bois	Trois premiers niveaux en béton	DesignARC
Forté	Résidentiel	2012	Melbourne	Australie	R+9	Panneau CLT	RDC	Lend Lease

Annexe B Débits de renouvellement d'air mensuel par ventilation naturelle saisis pour chaque logement

La ventilation naturelle a été modélisée avec des hypothèses spécifiques à la gestion des ouvertures de fenêtre. La surface ouvrante considérée pour le calcul de ventilation naturelle correspond à 30% de la surface des menuiseries. Les conditions d'ouverture des fenêtres sont les suivantes :

- la température intérieure est supérieure à 22°C ;
- la température intérieure est supérieure à la température extérieure ;
- la période d'ouverture se situe entre 19h et 8h.

Les débits de renouvellement d'air résultant de la ventilation naturelle sont issus du bâtiment de référence modélisé sous EnergyPlus avec le module intégré AIRNET. Afin de ne pas alourdir les temps de calcul durant la création des métamodèles, des scénarios moyens mensuels de renouvellement d'air correspondant à une journée type ont été saisis pour chaque logement dans le modèle EnergyPlus.

Les scénarios de débit de renouvellement d'air mensuels moyens (juin à septembre) obtenus par ventilation naturelle sont détaillés dans la Figure 94 pour le logement en rez-de-chaussée, Figure 95 pour le logement situé au premier étage, Figure 96 pour le logement situé au troisième étage et Figure 97 pour le logement situé au dernier étage.

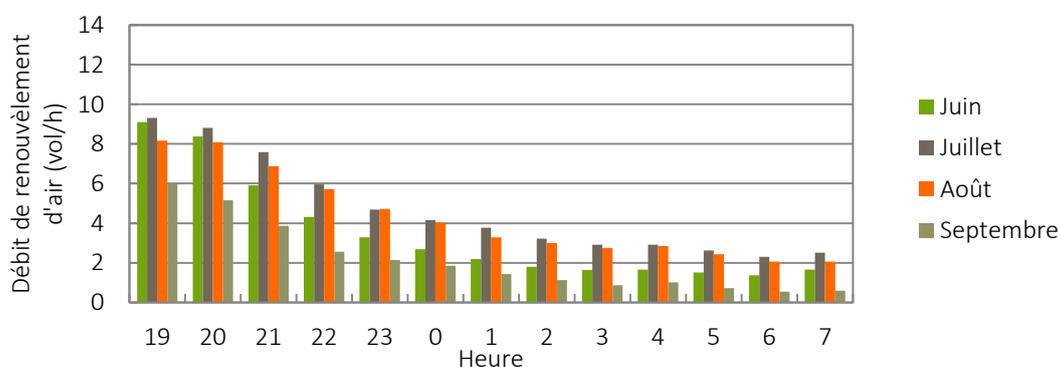


Figure 94 : Débits de renouvellement d'air mensuels horaires pour le logement situé en rez-de-chaussée

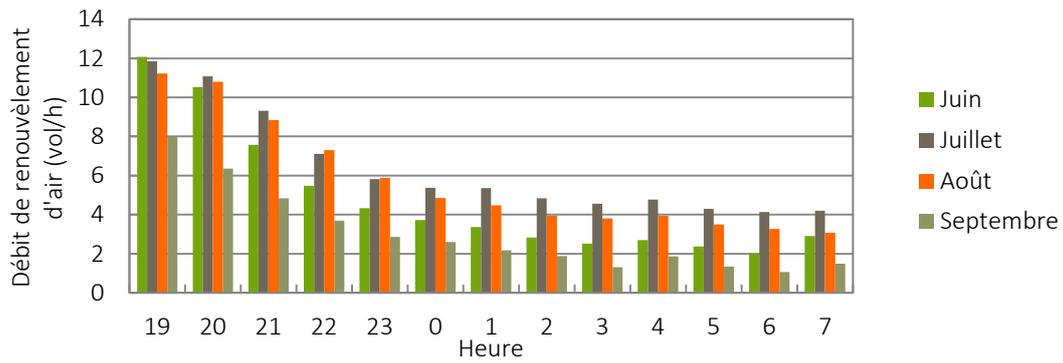


Figure 95 : Débits de renouvellement d'air mensuels horaires pour le logement situé au premier étage

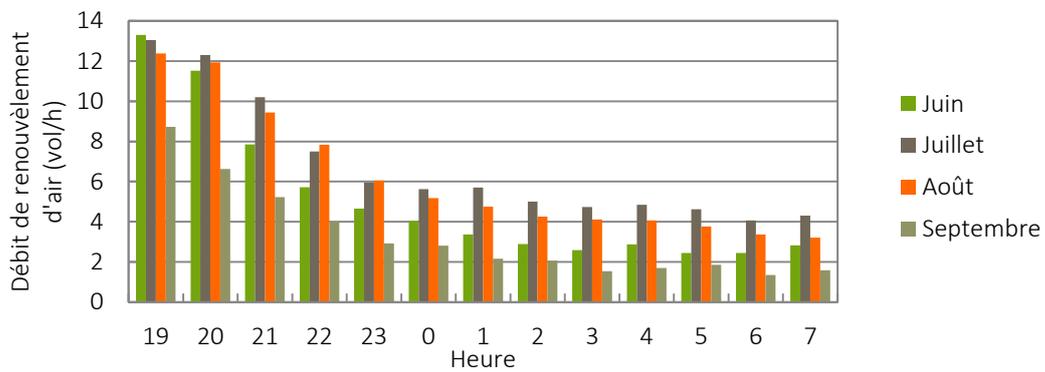


Figure 96 : Débits de renouvellement d'air mensuels horaires pour le logement situé au deuxième étage

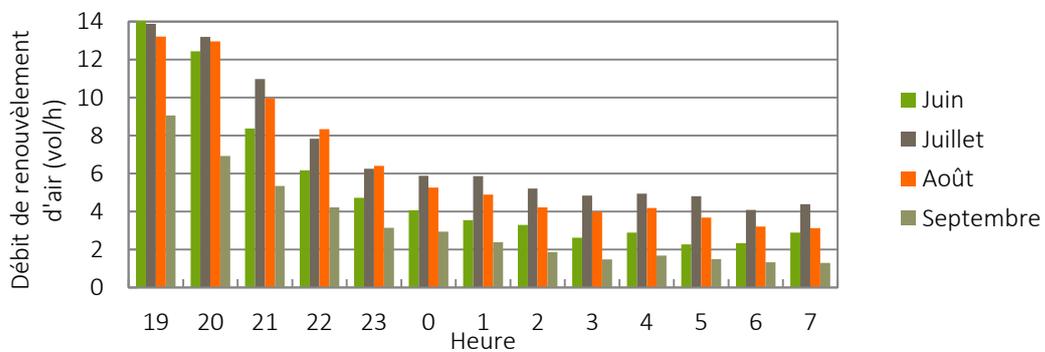


Figure 97 : Débits de renouvellement d'air mensuels horaires pour le logement situé au dernier étage

Annexe C Paramètres permettant une qualification du confort vibratoire des planchers bois

Planchers à solives selon l'Eurocode 5

La fréquence naturelle fondamentale du plancher se calcul à partir de l'équation qui suit :

$$f_{Hz} = \frac{\pi}{2 \times Portee_{pl}^2} \times \sqrt{\frac{(EI)_l}{M}} \quad [C. 1]$$

où :

- f_{Hz} est la fréquence naturelle fondamentale du plancher ;
- $Portee_{pl}$ est la portée du plancher ;
- $(EI)_l$ est la rigidité du plancher selon un axe perpendiculaire à la direction des solives ;
- M est la masse surfacique du plancher.

Le calcul de la vitesse impulsionnelle peut être réalisé à partir de l'équation suivante :

$$v = \frac{4 \times (0,4 + 0,6 \times n_{40})}{M \times L_{pl} \times Portee_{pl} + 200} \quad [C. 2]$$

où :

- v est la vitesse impulsionnelle ;
- n_{40} est le nombre de modes du premier ordre avec des fréquences naturelles inférieures à 40 Hz ;
- L_{pl} est la largeur de plancher.

La valeur du paramètre n_{40} se calcule comme suit :

$$n_{40} = \left\{ \left[\left(\frac{40}{f_{hz}} \right)^2 - 1 \right] \times \left(\frac{L_{pl}}{Portee_{pl}} \right)^4 \times \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25} \quad [C. 3]$$

où $(EI)_b$ est la rigidité du plancher selon un axe parallèle à la direction des solives qui prend uniquement en compte la rigidité apportée par le platelage et la chape béton lorsque celle-ci est présente.

Le calcul de la souplesse du plancher est plus difficile à aborder. Ce paramètre dépend de la composition du plancher et il n'existe pas de formule simplifiée unique pour l'évaluer. Dans son guide, Bocquet (2009) propose des méthodes de détermination de la souplesse de différents types de plancher à solives :

- platelage sur solivage simple ;
- platelage sur solivage simple renforcé transversalement ;
- platelage sur solivage supportant une chape béton légère et non collaborante ;

- platelage sur lambourde constituant des poutres transversales.

L'illustration qui suit présente de gauche à droite et de haut en bas les planchers considérés dans l'ordre dans lequel ils ont été cités.

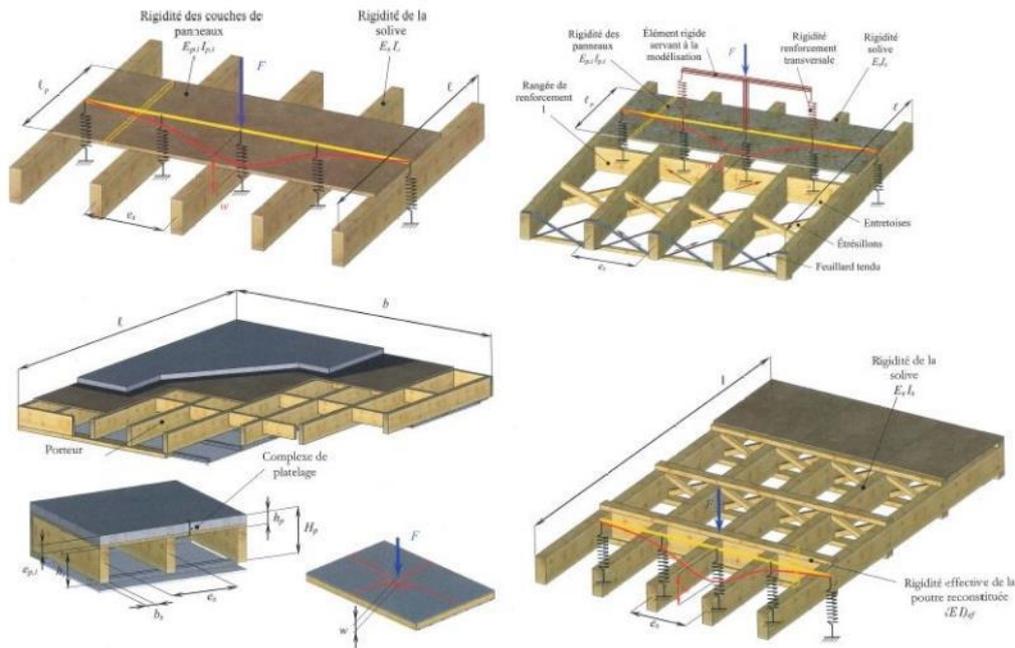


Figure 98 : Types de planchers dont un calcul de la souplesse est proposé par le Guide Eurocode sur la justification des planchers bois résidentiels (Bocquet 2009)

De manière générale, lorsque le plancher ne possède pas de chape béton, celui-ci peut être modélisé de la manière représentée sur l'illustration précédente comme une poutre qui est le platelage et qui repose sur cinq appuis élastiques que forment les solives. La souplesse se calcule alors à partir de la formule suivante :

$$a = \frac{k_s \times 10^3 \times (36 \times k_s^2 + 108 \times k_s \times k_p + 7 \times k_p^2 + 7 \times k_s \times k_p^2 \times K_{ent} + 12 \times k_s^2 \times k_p \times K_{ent})}{180 \times k_s^2 + 204 \times k_s \times k_p + 7 \times k_p^2 + 21 \times k_s \times k_p^2 \times K_{ent} + 60 \times k_s^2 \times k_p \times K_{ent}} \quad [C. 4]$$

où :

- a est la souplesse du plancher ;
- k_s est un paramètre qui dépend de la rigidité des solives et de leur portée ;
- k_p est un paramètre qui dépend de la rigidité du platelage et de l'entraxe entre solives ;
- K_{ent} est la raideur apportée par le renforcement transversal et vaut 0 lorsque celui-ci n'est pas présent.

Dans le cas où une chape béton est présente, la continuité de celle-ci ainsi que celle du platelage peut être considérée sur l'ensemble de la surface du plancher. Cette considération présente l'avantage de réduire la souplesse du plancher, mais rend dans le même temps son calcul plus complexe. Le plancher doit être modélisé comme une plaque nervurée par les solives. Hu & Chui (2004) proposent un modèle analytique afin d'aborder de manière simplifiée

la théorie des plaques nervurées qui est normalement d'application complexe. La formule qui suit est alors utilisée pour déterminer la souplesse du plancher :

$$a = \frac{4 \times 10^3}{Portee_{pl} \times L_{pl} \times \pi^4} \sum_{i=1,3,5} \sum_{j=1,3,5,\dots}^{35} \frac{1}{\left(\frac{i}{Portee_{pl}}\right)^4 \times D_x + 4 \times \left(\frac{i \times j}{Portee_{pl} \times L_{pl}}\right)^2 \times D_{xy} + \left(\frac{j}{L_{pl}}\right)^4 \times D_y} \quad [C. 5]$$

où :

- D_x est la rigidité composite en flexion des solives de plancher selon un axe perpendiculaire à l'axe des solives ;
- D_y est la rigidité composite en flexion des solives de plancher selon un axe parallèle à l'axe des solives ;
- D_{xy} est la rigidité composite du platelage multicouche et de l'inertie de torsion des solives.

Les paramètres de rigidité intervenant dans cette formule sont définis dans le *Guide Eurocode* (Bocquet 2009).

Pour être considéré comme satisfaisant vis-à-vis du confort vibratoire, le plancher à solives bois doit respecter deux critères qui font intervenir la vitesse impulsionnelle et la souplesse. La souplesse du plancher ne doit pas dépasser une certaine valeur et la vitesse impulsionnelle ne doit pas être supérieure à une vitesse impulsionnelle limite :

$a < 3 \text{ mm/kN}$	[C. 6]
$v \leq v_{max}$	[C. 7]

où v_{max} est la vitesse impulsionnelle limite.

La vitesse impulsionnelle limite dépend de la valeur de la souplesse et de la fréquence naturelle fondamentale du plancher. Elle se calcule par la formule suivante :

$v_{max} = b^{(f_{nz} \times \zeta - 1)}$	[C. 8]
---	--------

où :

- b est un paramètre directement lié à la valeur de la souplesse ;
- ζ est le coefficient d'amortissement modal.

Pour la valeur du coefficient d'amortissement modal, le *Guide Eurocode* préconise de retenir 1%. Le paramètre b se détermine à partir de la courbe présentée sur l'illustration suivante :

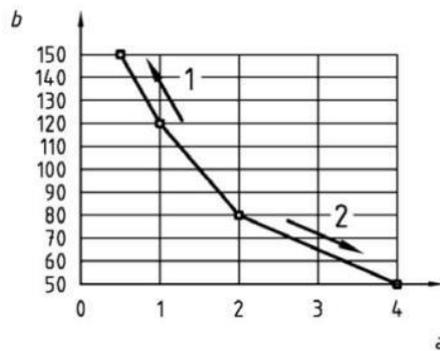


Figure 99 : Courbe permettant de déterminer la valeur du paramètre b en fonction de la valeur de la souplesse d'un plancher à solives (AFNOR 2010a)

Planchers CLT selon Manuel CLT (FPInnovations 2011)

FPInnovation propose de calculer la fréquence naturelle fondamentale du plancher à partir de l'équation [C. 9]. Cette équation permet la prise en compte d'une chape béton recouvrant le CLT.

$$f_{hz} = \frac{\pi}{2 \times \text{Portee}_{pl}^2} \sqrt{\frac{EI'}{M'}}$$

[C. 9]

Si recouvrement léger $M_r < 100 \text{ kg/m}^2$ alors $EI' = (EI)_{eff}^{1m}$ et $M' = \rho \times S_{pl}$

Si recouvrement lourd $M_r \geq 100 \text{ kg/m}^2$ alors $EI' = 0,9 \times (EI)_{eff}^{1m}$ et $M' = 0,9 \times \rho \times S_{pl}$

où :

- $(EI)_{eff}^{1m}$ est la rigidité effective du panneau de 1m de largeur ;
- ρ est la masse volumique du panneau ;
- A est la surface de la coupe transversale du panneau de 1m de largeur ;
- M' est la masse surfacique apportée par l'ensemble des composants ;
- M_r est la masse surfacique du revêtement et de la chape.

La souplesse se calcule selon la formule suivante :

$$a = \frac{1000 \times \text{Portee}_{pl}^3}{48 \times EI'}$$

[C. 10]

Annexe D Critères et hypothèses de vérification des structures en situation normale et en incendie

Vérification des planchers intermédiaires et des toitures

Plancher et toiture CLT selon Manuel CLT (FPInnovations 2011)

Le manuel CLT peut s'appuyer sur l'exploitation de diverses réglementations qu'elles soient européennes ou américaines. Par exemple, l'annexe B de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a) qui traite des poutres assemblées mécaniquement peut être utilisée pour le dimensionnement des panneaux de bois massif contrecollé. Puisque les Eurocodes définissent les règles de conception des bâtiments en Europe et donc en France, c'est sur leur exploitation que la réalisation des modules repose. L'annexe B de l'*Eurocode 5* permet alors de déterminer la rigidité effective en flexion d'une poutre assemblée mécaniquement ainsi que les contraintes de flexion et cisaillement auxquelles elle est soumise lorsqu'elle est sollicitée par un moment de flexion et un effort tranchant.

Les panneaux CLT assurent la fonction porteuse. Les charges étant perpendiculaires au plan des panneaux, ceux-ci doivent supporter des contraintes de flexion et de cisaillement. Le module développé permet alors, par le biais des critères ELU définis aux paragraphes 6.1.6 et 6.1.7 de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a), la vérification de la résistance des panneaux de bois contrecollé vis-à-vis de ces contraintes.

Pour la flexion :

$$\sigma_m \leq \frac{k_{\text{mod}} \times f_{m,k}}{\gamma_M}$$

[D. 1]

où :

- σ_m est la contrainte de flexion maximale ;
- k_{mod} est un facteur de modification qui dépend de la combinaison d'actions considérée et de l'humidité de l'élément en service ;
- $f_{m,k}$ est la valeur caractéristique de la résistance en flexion de l'élément ;
- γ_M est le coefficient partiel pour les propriétés du matériau pris par défaut égal à 1.3 pour le CLT comme préconisé dans la clause 2.4.1 de l'*annexe nationale de l'Eurocode 5* (AFNOR 2010a).

Pour le cisaillement :

$$\tau \leq \frac{k_{\text{mod}} \times f_{v,k}}{\gamma_M}$$

où :

- τ est la contrainte de cisaillement ;
- $f_{v,k}$ est la valeur caractéristique de la résistance en cisaillement de l'élément.

[D. 2]

La méthode de l'annexe B aussi appelée méthode gamma permet le calcul de la rigidité effective en considérant les propriétés des sections de poutres qui sont assemblées ainsi que du facteur d'efficacité de raccordement γ . Celui-ci fait intervenir la rigidité des attaches mécaniques K ainsi que de leur espacement s le long de la poutre dans le rapport s/K . Un facteur γ valant 0 signifie que les poutres ne sont pas raccordées. Au contraire l'assemblage est considéré comme parfait lorsque le facteur vaut 1. Afin de faire le lien avec l'annexe B de l'Eurocode 5 partie 1.1, les panneaux CLT peuvent être assimilés à des poutres assemblées mécaniquement. Lors de leur dimensionnement seul, les plis comportant des lamelles dont l'orientation est parallèle au sens de portée du plancher sont supposés porter la charge. Les plis longitudinaux sont alors considérés comme des poutres raccordées entre elles par les couches transversales qui font office d'attaches et dont la rigidité est égale à leur rigidité au cisaillement roulant. Le cisaillement roulant est un phénomène observable lorsque les panneaux sont soumis à la flexion. L'illustration qui suit présente la déformation d'un panneau CLT due au cisaillement roulant.

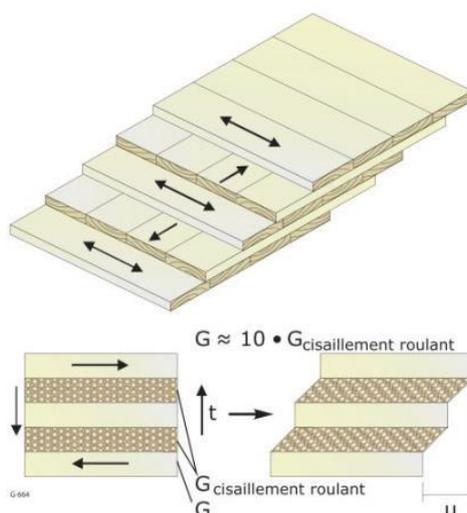


Figure 100 : Déformation d'un panneau CLT due au cisaillement roulant (FPInnovations 2011)

La détermination du facteur γ passe alors par la connaissance du module de cisaillement roulant du bois constituant les couches transversales. Cependant peu d'informations sont disponibles sur les méthodes de détermination de cette caractéristique. Mestek et al. (2008) recommandent de considérer la valeur du module de cisaillement roulant comme étant égale à 1/10 de la valeur du module de cisaillement parallèle à la fibre du bois. C'est cette valeur qui

est retenue pour l'élaboration du module. Le rapport s/K qui permet de calculer le facteur γ dans l'annexe B de l'Eurocode 5 partie 1.1 est remplacé par l'expression suivante :

$$\frac{s}{K} = \frac{h_{plis_T_Pl}}{G_R \times L_{pl}} \quad [D. 3]$$

où :

- G_R est le module de cisaillement roulant ;
- $h_{plis_T_Pl}$ est l'épaisseur de la couche transversale ;
- L_{pl} est la largeur du panneau.

L'expression du facteur γ dans l'Eurocode devient donc :

$$\gamma = \frac{1}{1 + \pi^2 \times \frac{E_{mean} \times A_T}{Portee_{pl}^2} \times \frac{h_{plis_T_Pl}}{G_R \times L_{pl}}} \quad [D. 4]$$

où :

- E_{mean} est le module d'élasticité longitudinal moyen du bois constituant la couche longitudinal ;
- A_T est l'aire de la section transversale de la couche longitudinale.

La rigidité effective du panneau est ensuite calculée à partir de la formule (B.1) de l'annexe B de l'Eurocode 5

$$(EI)_{eff} = \sum (E_{mean} \times I + \gamma \times E_{mean} \times A_T \times d_{LT}^2) \quad [D. 5]$$

où :

- $(EI)_{eff}$ est la rigidité effective du panneau ;
- I est l'inertie des couches longitudinales ;
- d_{LT} est la distance entre le centre géométrique de la section transversale de la couche longitudinale et le centre géométrique de la section transversale du panneau.

Pour le calcul de la contrainte de flexion :

$$\sigma_m = \frac{M_f \times E_{mean,1}}{(EI)_{eff}} \times (\gamma_1 \times d_{LT1} + 0,5 \times h_{plis_L_Pl_1})$$

[D. 6]

où :

- M_f est le moment fléchissant agissant sur le panneau de plancher ;
- $E_{mean,1}$ est le module d'élasticité longitudinal moyen du bois constituant la couche longitudinale supérieure du panneau ;
- γ_1 est le facteur d'efficacité de raccordement caractérisé par la première couche transversale ;
- d_{LT1} est la distance entre le centre géométrique de la section transversale de la première couche longitudinale et le centre géométrique de la section transversale du panneau ;
- $h_{plis_L_Pl_1}$ est la hauteur de la première couche longitudinale.

Pour le calcul de la contrainte de cisaillement :

$$\tau = \frac{V_t \times E_{mean} \times M_s}{(EI)_{eff} \times L_{pl}}$$

[D. 7]

où :

- V_t est l'effort tranchant agissant sur le panneau de plancher
- M_s est le moment statique de la section transversale du panneau

La résistance au cisaillement doit en toute rigueur être vérifiée pour l'ensemble des couches composant le panneau. Cette vérification est différente selon la couche considérée. Pour une couche longitudinale c'est la résistance au cisaillement longitudinale qui est vérifiée. Lorsqu'il s'agit d'une couche transversale la vérification porte sur le cisaillement roulant. Il est à noter que la résistance au cisaillement roulant est plus faible que pour le cisaillement longitudinal. La contrainte de cisaillement étant maximale au centre du panneau, seules les couches longitudinale et transversale les plus au centre sont vérifiées. Dans le cas d'un panneau dont la couche centrale est une couche transversale il n'est pas nécessaire de vérifier le cisaillement longitudinal puisque la contrainte sera plus importante au niveau d'une couche qui présente une résistance au cisaillement plus faible. Comme présenté dans la formule précédente, le calcul de la contrainte de cisaillement passe par la détermination d'un moment statique. L'illustration suivante sert de base à la définition d'un moment statique.

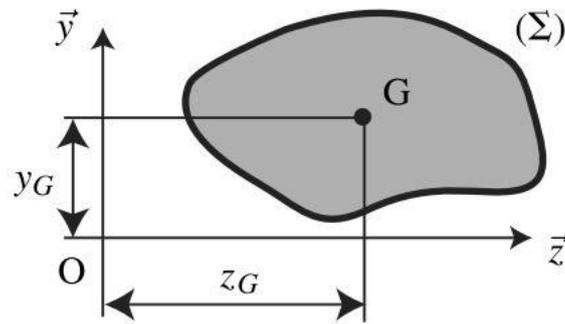


Figure 101 : Représentation d'une surface servant de base à la définition du moment statique, (Delaplace et al. 2008)

Le moment statique de la section Σ représentée sur l'illustration précédente par rapport à l'axe $O\vec{y}$ est calculé à partir de l'équation suivante :

$$M_s^{\vec{y}} = \iint_{\Sigma} z dy dz = S_{z_G} \quad [D. 8]$$

Pour le moment statique par rapport à l'axe $O\vec{z}$ l'équation suivante est employée :

$$M_s^{\vec{z}} = \iint_{\Sigma} y dx dy = S_{y_G} \quad [D. 9]$$

Le moment statique possède donc les propriétés suivantes :

- le moment statique d'une surface est nul par rapport à un axe passant par son centre de gravité ;
- le moment statique d'une surface par rapport à un axe est égal au produit de sa surface par la distance entre son centre de gravité et l'axe.

Lors de la vérification au cisaillement d'un panneau le moment statique à considérer dépend de l'orientation des plis et du type de cisaillement étudié (longitudinal ou roulant). Si le plis central est une couche transversale, seul le cisaillement roulant est à vérifier. Dans ce cas le moment statique à considérer est celui de la surface se trouvant au-dessus de l'axe passant par le centre de gravité du panneau calculé par rapport à ce même axe. Pour un panneau dont le plis central est composé de lamelles orientées dans le sens de la portée il est nécessaire de vérifier le cisaillement longitudinal et le cisaillement roulant. Pour le cisaillement longitudinal il faut considérer le moment statique de la surface se trouvant au-dessus de l'axe passant par le centre de gravité du panneau calculé par rapport à ce même axe. Lorsque le cisaillement roulant est étudié, le moment statique à considérer est celui de la surface se trouvant au-dessus de l'axe passant par la limite supérieure de la couche centrale calculé par rapport à ce même axe. En s'appuyant sur un panneau CLT 5 plis, l'exemple du calcul des moments statiques pour les vérifications aux cisaillements longitudinal et roulant est donné.

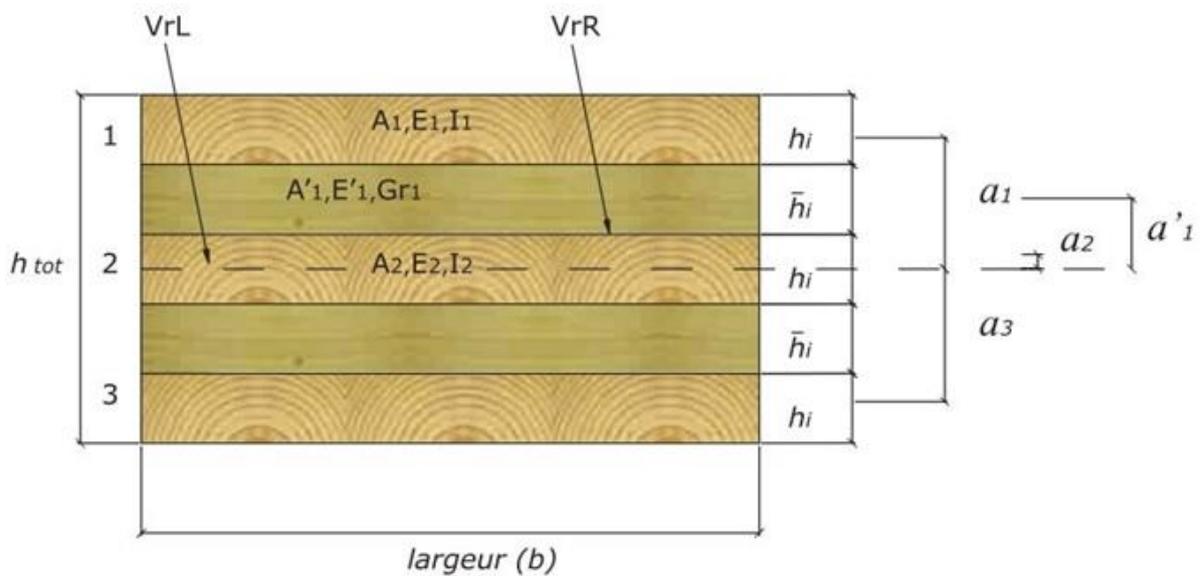


Figure 102 : Panneau CLT5 plis et données permettant le calcul des moments statiques pour la vérification au cisaillement, (FPInnovations 2011)

Pour la vérification au cisaillement longitudinal :

$$(EM_s)_L = \gamma_1 \times E_1 \times A_1 \times a_1 + E'_1 \times A'_1 \times a'_1 + \gamma_2 \times E_2 \times \frac{A_2}{2} \times a_2 \quad [D. 10]$$

Si les modules d'élasticité longitudinale sont égaux pour l'ensemble des couches :

$$(M_s)_L = \gamma_1 \times A_1 \times a_1 + A'_1 \times a'_1 + \gamma_2 \times \frac{A_2}{2} \times a_2 \quad [D. 11]$$

Pour la vérification au cisaillement roulant :

$$(EM_s)_R = \gamma_1 \times E_1 \times A_1 \times \left(a_1 - \frac{h_2}{2} \right) + E'_1 \times A'_1 \times \left(a'_1 - \frac{h_2}{2} \right) \quad [D. 12]$$

De la même manière, si l'ensemble des modules d'élasticité longitudinale sont égaux :

$$(M_s)_R = \gamma_1 \times A_1 \times \left(a_1 - \frac{h_2}{2} \right) + A'_1 \times \left(a'_1 - \frac{h_2}{2} \right) \quad [D. 13]$$

Pour la vérification des panneaux en situation incendie, les contraintes de flexion et cisaillement doivent également être vérifiées. Les actions prises en compte pour le calcul des contraintes sont celles obtenues par la méthode de prédimensionnement qui considère des charges réduites de 30% par rapport à celles agissant en situation normale. Les critères ELU à vérifier pour la situation incendie sont les suivants :

Pour la contrainte de flexion en situation incendie :

$$\sigma_{m,fi} \leq \frac{k_{fi} \times k_{mod,fi} \times f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} \quad [D. 14]$$

où :

- $\sigma_{m,fi}$ est la contrainte de flexion maximale en situation incendie ;
- k_{fi} est le coefficient qui permet de transformer une valeur caractéristique du fractile à 5% au fractile à 20%. La valeur de 1.15 est retenue comme pour le lamellé collé qui est le produit se rapprochant le plus du CLT ;
- $k_{mod,fi}$ est le facteur de modification en situation incendie qui vaut 1 lorsque la méthode de la section réduite est utilisée ;
- $\gamma_{M,fi}$ est le coefficient partiel pour les propriétés du matériau en situation incendie vallant 1.

Pour la contrainte de cisaillement en situation incendie :

$$\tau_{fi} \leq \frac{k_{fi} \times k_{mod,fi} \times f_{v,k}}{\gamma_{M,fi}} \quad [D. 15]$$

où τ_{fi} est la contrainte de cisaillement en situation incendie.

Le chapitre 8 du *Manuel CLT* (FPIinnovations 2011) propose pour la vérification en situation incendie d'utiliser la méthode de la section réduite. Dans *l'Eurocode 5 partie 1.2* (AFNOR 2005a) qui traite du dimensionnement en situation incendie des structures en bois, cette méthode est également employée. Son principe est de déterminer, après un certain temps d'exposition au feu, la section de bois qui n'est pas carbonisée et qui continue d'assurer une fonction porteuse. Dans le cas d'un panneau CLT utilisé en plancher où seuls les plis longitudinaux sont considérés comme supportant la charge, si la limite de carbonisation se situe au niveau d'un pli transversal, celui-ci est considéré comme complètement carbonisé. Le module, en s'appuyant sur *l'Eurocode 5*, permet de considérer la protection apportée par le revêtement de faux plafond. En ce qui concerne la vitesse de carbonisation nécessaire au calcul de la section réduite, celle-ci est dépendante du type de panneau utilisé et est renseignée sur les avis techniques obtenus par les différents fabricants. A partir de la section réduite, la détermination de la rigidité effective et des moments statiques est effectuée comme décrit précédemment ce qui permet de calculer les contraintes de flexion et de cisaillement en situation incendie.

Les panneaux de plancher doivent satisfaire les critères ELS relatifs aux déformations. Les flèches limites à respecter sont renseignées dans *l'Eurocode 5* (AFNOR 2008a). Elles concernent les déformations instantanées sous charges variables et les déformations prenant en compte le fluage sous charges variables et permanentes. Les critères suivants sont ceux à respecter :

Pour la flèche instantanée sous charges variables :

$$w_{inst}(Q_v) \leq \frac{Portee_{pl}}{300}$$

où $w_{inst}(Q_v)$ est la flèche instantanée sous charges variables.

[D. 16]

Pour la flèche finale prenant en compte le fluage :

$$w_{net,fin} \leq \frac{Portee_{pl}}{250}$$

où $w_{net,fin}$ est la flèche finale prenant en compte le fluage.

[D. 17]

Le calcul des flèches finales, fait intervenir selon l'*Eurocode 5* un facteur de déformation qui dépend du matériau et de son humidité en service. N'étant pas référencé dans les Eurocodes, aucune valeur de ce facteur n'est disponible pour le CLT. Une étude menée à l'Université de Graz en Autriche (Jöbstl and Schickhofer 2007) a montré que le comportement des panneaux de bois lamellé croisé vis-à-vis du fluage est plus proche de celui du contreplaqué que celui du lamellé collé. Les auteurs recommandent alors de prendre pour les panneaux composés de 7 couches ou moins un facteur de déformation égale à celui du contreplaqué augmenté de 10% et pour les panneaux de 9 couches et plus un facteur de déformation égale à celui du contreplaqué.

Plancher et toitures solives selon l'Eurocode 5

Les charges reprises par le plancher sollicitent les solives ainsi que le platelage. Ces deux éléments sont alors à vérifier. Les charges d'exploitation répartie et ponctuelle ne sont pas considérées comme agissant en même temps. Le platelage est alors vérifié en deux temps avec tout d'abord la charge d'exploitation répartie et ensuite en considérant la charge d'exploitation ponctuelle. Les charges permanentes combinées à la charge d'exploitation répartie sollicitent le platelage dans le plan perpendiculaire au plancher. Il résulte de ces sollicitations des contraintes de flexion et de cisaillement qui doivent être vérifiées par le biais de critères ELU. Pour la flexion le module se reporte au paragraphe 6.1.6 de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a) et au paragraphe 6.1.7 pour le cisaillement. Selon le *DTU 51.3* (AFNOR 2004c).

Les panneaux de platelage doivent au minimum reposer sur trois solives. C'est à partir de cette considération que le module calcul les contraintes de flexion et cisaillement. Toujours en considérant cette modélisation du panneau de platelage et la charge d'exploitation répartie, les déformations sont vérifiées par le module. L'annexe nationale de l'*Eurocode 5* (AFNOR 2010a) dans la clause 7.2 indique que les panneaux de plancher doivent respecter une flèche finale maximale prenant en compte le fluage. Cette flèche est prise égale au 250^e de la portée du panneau qui correspond à l'entraxe des solives. La vérification du platelage en considérant la charge d'exploitation ponctuelle est difficile à aborder simplement de manière calculatoire puisqu'il faut faire appel à la théorie des plaques. C'est donc à partir de résultats d'essais³⁵ fournis par les fabricants que les vérifications ELU et ELS sous charge d'exploitation ponctuelle sont effectuées. Les valeurs des paramètres suivants doivent être connues :

³⁵ Essais décrits dans la norme NF EN 12871

- $F_{max,k,05}$: résistance caractéristique maximale du platelage à l'application d'une charge ponctuelle sur le plancher en partie courante ou au droit d'un joint de panneau ;
- $F_{ser,k,05}$: résistance caractéristique qui garantit que, jusqu'à l'atteinte de cette charge, aucun endommagement ou fissuration ne se produit sur le platelage en partie courante ou au droit d'un joint de panneau ;
- R_{mean} : rigidité moyenne du plancher sous charge ponctuelle en partie courante ou au droit d'un joint de panneau.

Le critère ELU suivant est à satisfaire :

$$Q_k \leq \frac{F_{max,k,05} \times k_{mod}}{\gamma_M \times k_{dis}} \quad [D. 18]$$

où :

- Q_k est la charge d'exploitation ponctuelle ;
- k_{dis} est un coefficient qui permet de prendre en compte que la charge ponctuelle s'applique sur un carré de 50 mm de côté et non pas sur une surface circulaire de 25 mm de diamètre comme lors des essais permettant de déterminer $F_{max,k,05}$ et $F_{ser,k,05}$.

Et les critères ELS à respecter sont les suivants :

$$Q_k \leq \frac{F_{ser,k,05}}{k_{dis}}$$

$$\frac{Q_k}{R_{mean}} \times \frac{1 + \psi_2 \times k_{def,x}}{1 + \psi_2 \times k_{def,y}} \leq \frac{E_{nt}}{250} \quad [D. 19]$$

où :

- ψ_2 est un facteur pour la valeur quasi permanente de l'action variable qui dépend de la catégorie d'usage du bâtiment ;
- $k_{def,x}$ est le facteur de déformation qui dépend du type de platelage et de son humidité en service ;
- $k_{def,y}$ est le facteur de déformation qui dépend des conditions d'essai qui ont permis de déterminer R_{mean} ;
- E_{nt} est la portée du platelage qui correspond à l'entraxe entre solives.

Le module est en mesure d'effectuer ces vérifications si les valeurs des paramètres résultants des essais sont renseignées.

Tout comme le platelage, les solives sont soumises à des contraintes de flexion et de cisaillement dues aux sollicitations perpendiculaires au plan du plancher. Les solives sont modélisées comme des poutres sur deux appuis d'une portée égale à celle du plancher. Lorsqu'une poutre est soumise à une contrainte de flexion, la stabilité au déversement doit être vérifiée. Une poutre fléchie voit l'une de ses faces tendue et l'autre comprimée. Lorsque

l'effort de compression dépasse une valeur critique, la face comprimée flambe et la poutre se déverse. Le flambement est également un phénomène d'instabilité qui survient lorsqu'un élément est comprimé. Si cet effort de compression devient trop important, l'élément va avoir tendance à fléchir, c'est ce phénomène qui est nommé flambement. Dans le cas des solives de plancher, les efforts sont verticaux descendants, c'est donc leur face supérieure qui est comprimée et qui en flambant peut entraîner le déversement de l'élément. Cependant, le platelage joue un rôle d'anti-déversement en maintenant les faces supérieures des solives. Le déversement n'est donc pas à vérifier pour les solives du plancher. En utilisant la méthode de la section réduite prescrite dans l'*Eurocode 5 partie 1.2* (AFNOR 2005a) qui traite de la stabilité au feu des éléments de structure bois, les solives sont vérifiées en situation incendie. Les efforts considérés dans cette situation proviennent de la méthode utilisée en prédimensionnement qui consiste à réduire de 30% les valeurs des efforts qui s'appliquent à froid. Les critères ELS concernant les déformations sont également vérifiés par le module. Conformément à l'annexe nationale de l'*Eurocode 5* (AFNOR 2010a), les valeurs des flèches limites sont les suivantes :

$$w_{net,fin} \leq \frac{Portee_{pl}}{200}$$

$$w_{inst}(Q_v) \leq \frac{Portee_{pl}}{300}$$

[D. 20]

où $Portee_{pl}$ est la portée des solives.

Vérification des murs

Mur CLT selon Manuel CLT (FPInnovations 2011)

La première vérification ELU porte sur la combinaison de flexion et compression. Une telle combinaison de contrainte amène à considérer l'instabilité au flambement de l'élément. Le critère à vérifier est donné dans le paragraphe 6.3.2 de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a) :

$$\left| \frac{\sigma_c \times \gamma_M}{k_c \times k_{\text{mod}} \times f_{c,0,k}} \right| + \left| \frac{\sigma_m \times \gamma_M}{k_{\text{mod}} \times f_{m,k}} \right| \leq 1 \quad [\text{D. 21}]$$

où :

- σ_c est la contrainte de compression ;
- k_c est le facteur d'instabilité au flambement ;
- $f_{c,0,k}$ est la valeur caractéristique de la résistance en compression axiale ;
- k_{mod} est un facteur de modification qui dépend de la combinaison d'actions considérée et de l'humidité de l'élément en service ;
- γ_M est le coefficient partiel pour les propriétés du matériau pris par défaut égal à 1.3 pour le CLT comme préconisé dans la clause 2.4.1 de l'annexe nationale de l'Eurocode 5 (AFNOR 2010a) ;
- σ_m est la contrainte de flexion ;
- $f_{m,k}$ est la valeur caractéristique de la résistance en flexion de l'élément.

Toutefois, dans certains cas, le risque de flambement de l'élément est nul et le critère à vérifier est celui donné dans le paragraphe 6.2.4 de l'Eurocode 5 partie 1.1 (AFNOR 2008a) :

$$\left| \frac{\sigma_c \times \gamma_M}{k_{\text{mod}} \times f_{c,0,k}} \right|^2 + \left| \frac{\sigma_m \times \gamma_M}{k_{\text{mod}} \times f_{m,k}} \right| \leq 1 \quad [\text{D. 22}]$$

Le rapport relatif d'élançement est le paramètre qui permet de déterminer si un élément est soumis au risque de flambement et qui conditionne donc le choix du critère à vérifier. L'élément n'est pas considéré être en mesure de flamber lorsque le rapport relatif d'élançement est inférieur ou égal à 0,3. Dans le cas où le risque de flambement est avéré, la valeur du rapport relatif d'élançement rentre dans le processus de détermination du facteur d'instabilité.

$$k_c = \frac{1}{u + \sqrt{u^2 - \lambda_{\text{rel}}^2}} \quad [\text{D. 23}]$$

où :

- λ_{rel} est le rapport relatif d'élançement ;
- u est un facteur défini par l'expression qui suit.

$$u = 0,5 \times (1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2)$$

[D. 24]

où $\beta_c = 0,1$ est le facteur de rectitude en faisant l'hypothèse d'une déviation de rectitude inférieure ou égale au 500e de la portée de l'élément.

Le *Manuel CLT* (FPInnovations 2011) recommande l'utilisation de l'annexe C de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a) pour le calcul du rapport relatif d'élançement. Cette annexe traite le sujet des poteaux reconstitués. Étant réalisés à partir d'un ensemble de couches d'orientations différentes, les panneaux CLT utilisés en murs peuvent être considérés comme de tels poteaux. L'annexe C donne la méthode de calcul d'un rapport d'élançement efficace qui permet de déterminer le rapport relatif d'élançement.

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda_{eff}}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

[D. 25]

où :

- λ_{eff} est le rapport d'élançement efficace ;
- $E_{0,05}$ est la valeur à 5% du module d'élasticité parallèle au fil.

Le rapport d'élançement efficace se calcule à partir de l'expression suivante :

$$\lambda_{eff} = h_{mur} \sqrt{\frac{A_{tot}}{I_{eff}}}$$

[D. 26]

où :

- h_{mur} est la hauteur du mur ;
- A_{tot} est l'aire totale de la section du panneau ;
- I_{eff} est l'inertie effective du panneau calculée en utilisant l'annexe B de l'*Eurocode 5 partie 1.1* comme cela est décrit dans la présentation du module dédié aux planchers CLT.

L'inertie effective du panneau nécessite l'emploi de l'annexe B de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a). Le calcul de la rigidité effective d'un panneau à partir de cette annexe a été décrit précédemment. Connaissant cette rigidité, il est possible d'obtenir l'inertie effective par l'équation qui suit :

$$I_{eff} = \frac{(EI)_{eff}}{E_{mean}}$$

[D. 27]

où :

- $(EI)_{eff}$ est la rigidité effective calculée suivant l'annexe B de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a) ;
- E_{mean} est la valeur moyenne du module d'élasticité parallèle au fil du panneau.

La seconde vérification ELU porte sur la contrainte de cisaillement. La méthode de vérification est identique à celle indiquée dans la présentation du module dédié aux planchers CLT. Le critère à vérifier est donné dans le paragraphe 6.1.7 de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a) :

$$\tau \leq \frac{k_{\text{mod}} \times f_{v,k}}{\gamma_M} \quad [\text{D. 28}]$$

où :

- τ est la contrainte de cisaillement ;
- $f_{v,k}$ la valeur caractéristique de la résistance en cisaillement de l'élément.

La contrainte de cisaillement doit être vérifiée dans les différentes couches du panneau. Pour les couches orientées verticalement c'est la résistance au cisaillement longitudinal qui fait l'objet d'une vérification. Quand il s'agit des autres couches, la vérification porte sur la résistance au cisaillement roulant qui est plus faible.

Une fois les vérifications à froid effectuées, il est également nécessaire de vérifier la résistance des panneaux en situation incendie. Cette vérification s'appuie sur les recommandations fournies dans le chapitre 8 du *Manuel CLT* (FPInnovations 2011). La méthode de la section réduite est utilisée et les efforts considérés proviennent de la méthode de prédimensionnement qui consiste à prendre des efforts réduits de 40% par rapport à ceux s'appliquant à froid. Les critères à vérifier portent sur la combinaison de contraintes en flexion et compression ainsi que sur la contrainte de cisaillement qui doit être vérifiée pour l'ensemble des couches du panneau :

$$\left| \frac{\sigma_{c,fi} \times \gamma_{M,fi}}{k_{c,fi} \times k_{fi} \times k_{\text{mod},fi} \times f_{c,0,k}} \right| + \left| \frac{\sigma_{m,fi} \times \gamma_{M,fi}}{k_{fi} \times k_{\text{mod},fi} \times f_{m,k}} \right| \leq 1 \quad [\text{D. 29}]$$

où :

- $\sigma_{c,fi}$ est la contrainte de compression en situation incendie ;
- $\sigma_{m,fi}$ est la contrainte de flexion en situation incendie ;
- $k_{c,fi}$ est le facteur d'instabilité au flambement en situation incendie calculé à partir de la section de panneau réduite ;
- k_{fi} est le coefficient qui permet de transformer une valeur caractéristique du fractile à 5% au fractile à 20%. La valeur de 1.15 est retenue comme pour le lamellé collé qui est le produit se rapprochant le plus du CLT ;
- $k_{\text{mod},fi}$ est le facteur de modification en situation incendie qui vaut 1 lorsque la méthode de la section réduite est utilisée ;
- $\gamma_{M,fi}$ est le coefficient partiel pour les propriétés du matériau en situation incendie valant 1.

Dans le cas où $\lambda_{rel,fi} \leq 0,3$:

$$\left| \frac{\sigma_{c,fi} \times \gamma_{M,fi}}{k_{fi} \times k_{mod,fi} \times f_{c,0,k}} \right|^2 + \left| \frac{\sigma_{m,fi} \times \gamma_{M,fi}}{k_{fi} \times k_{mod,fi} \times f_{m,k}} \right| \leq 1 \quad [D. 30]$$

$$\tau_{fi} \leq \frac{k_{fi} \times k_{mod,fi} \times f_{v,k}}{\gamma_{M,fi}}$$

où τ_{fi} est la contrainte de cisaillement en situation incendie.

Mur ossature bois selon l'Eurocode 5

Les sollicitations verticales dues aux charges permanentes, d'exploitation, de neige et de vent entraînent une contrainte de compression qui agit sur les montants du mur ossature bois. Les montants comprimés qui prennent appui sur la lisse basse entraînent à leur tour une contrainte de compression perpendiculaire au fil sur cette dernière. Les sollicitations horizontales dues aux charges de vent ont pour conséquence de fléchir les montants et imposent également une contrainte de cisaillement. Finalement les montants d'ossature sont sollicités par une combinaison de flexion et compression ainsi que par une contrainte de cisaillement. La lisse basse est quant à elle soumise à des contraintes de compression perpendiculaire au fil au niveau de chaque montant. La première vérification ELU porte sur la combinaison de flexion et compression. Une telle combinaison de contrainte amène à considérer l'instabilité au flambement de l'élément. Cependant, les montants sont maintenus par le voile contreventant et ne peuvent flamber suivant leur plus faible inertie. Toutefois, l'instabilité reste à considérer pour l'axe présentant la plus forte inertie. Le critère à vérifier pour cette combinaison de contrainte est le même que celui présenté pour le module relatif aux murs CLT. Il est donné dans le paragraphe 6.3.2 de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a). Le risque de flambement de l'élément est considéré nul lorsque le rapport relatif d'élançement est inférieur ou égal à 0.3. Dans ce cas, le critère à vérifier est celui donné dans le paragraphe 6.2.4 de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a). Le calcul du rapport relatif d'élançement fait intervenir le rapport d'élançement comme le montre l'expression suivante :

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda_e}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad [D. 31]$$

où λ_e est le rapport d'élançement.

Le rapport d'élançement se calcule par l'équation qui suit lorsque le risque de flambement concerne l'axe de plus forte inertie des montants :

$$\lambda_e = \frac{2\sqrt{3} \times L_m}{h_m} \quad [D. 32]$$

où :

- L_m est la longueur des montants ;
- h_m est la hauteur des montants.

Le facteur d'instabilité k_c peut être calculé selon l'équation [D. 23]. La valeur du facteur de rectitude β_c est prise égale à 0,2 pour le bois massif et à 0,1 pour le lamellé-collé.

Le cisaillement fait l'objet de la seconde vérification ELU. C'est le critère donné au paragraphe 6.1.7 de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a) qui est utilisé.

La compression perpendiculaire au fil est traitée dans le paragraphe 6.1.5 de l'*Eurocode 5 partie 1.1* (AFNOR 2008a). Le critère à vérifier est le suivant :

$$\frac{\sigma_{c,90} \times \gamma_M}{k_{c,90} \times k_{\text{mod}} \times f_{c,90,k}} \leq 1 \quad [\text{D. 33}]$$

où :

- $\sigma_{c,90}$ est la contrainte de compression perpendiculaire au fil ;
- $k_{c,90} = 1,25$ pour le bois massif de résineux et $k_{c,90} = 1,5$ pour le lamellé collé de résineux est un facteur qui tient compte de la configuration de chargement, de la possibilité de fendage et du degré de déformation en compression ;
- $f_{c,90,k}$ est la valeur caractéristique de la résistance en compression perpendiculaire.

La contrainte de compression perpendiculaire au fil agit en pied de chaque montant. L'aire à considérer pour le calcul de la contrainte ne correspond pas directement à l'aire de la section du montant, mais à une aire de contact efficace qui prend en compte la répartition de la contrainte.

Pour la stabilité au feu du mur ossature bois, c'est la capacité de la paroi à maintenir son aptitude au contreventement qui est vérifiée. En cas d'incendie, lorsque le voile de contreventant se situe du côté intérieur ce sont les panneaux OSB qui vont en premier subir une dégradation. Pour être stable un mur ossature bois doit maintenir sa capacité contrevenante assurée par les panneaux OSB. D'après le *DTU 31.2* (AFNOR, 2011) qui traite de la construction de maisons et bâtiments à ossature bois, cette capacité est considérée maintenue tant que l'épaisseur du panneau n'est pas inférieure à 9 mm pour de l'OSB de type 3 et à 8 mm pour de l'OSB de type 4. La méthode de la section réduite permet de calculer l'épaisseur finale du panneau après une durée définie d'exposition au feu. Si cette épaisseur satisfait les conditions précédentes, le mur ossature est considéré stable au feu pendant la durée définie. Lorsque le voile de contreventement se situe du côté extérieur la méthode de la section réduite est appliquée sur les montants d'ossature.

Annexe E Hypothèses considérées pour la détermination des charges de neige et de vent sur les toitures et les murs

Détermination des charges de neige et de vent sur les toitures

Le calcul des charges de neige sur une toiture s'effectue à partir de l'*Eurocode 1 partie 1.3* (AFNOR 2004b) et de son annexe nationale (AFNOR 2007b). La formule suivante permet de déterminer la sollicitation :

$$S = \mu_n \times C_e \times C_t \times S_k$$

où :

- S est la charge de neige ;
- μ_n est le coefficient de forme pour la charge de neige ;
- C_e est le coefficient d'exposition qui dépend de la topographie du site de construction ;
- C_t est le coefficient thermique qui prend en compte l'effet de la chaleur interne du bâtiment sur la réduction de la charge de neige ;
- S_k est la valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol.

[E. 1]

En fonction du lieu de construction et de son altitude, l'annexe nationale donne les valeurs caractéristiques de la charge de neige sur le sol pour l'ensemble du territoire français. Pour la réalisation des modules, les hypothèses prises sont les suivantes :

- Coefficient de forme : $\mu_n = 0,8$

Le coefficient de forme permet de prendre en compte l'influence sur la charge de neige de l'effet du vent et de la forme de la toiture. La valeur retenue correspond à une toiture de pente inférieure ou égale à 30° qui s'applique donc dans le cas des toitures-terrasses

- Coefficient d'exposition : Site normal $C_e = 1$

Un site normal est défini comme étant une zone où le balayage de la neige et du vent n'est pas important grâce à la configuration du terrain, la présence d'autres constructions ou d'arbres. Cette définition convient au milieu urbain dans lequel la majorité des bâtiments multiétages sont construits.

- Coefficient thermique : $C_t = 1$

Cette valeur sécuritaire du coefficient thermique signifie que la charge de neige n'est pas réduite. Une valeur inférieure est généralement retenue pour les toitures vitrées qui présentent une transmittance thermique élevée.

- Altitude du bâtiment inférieure ou égale à 2000 m

L'annexe nationale précise que l'*Eurocode 1 partie 1.3* n'est applicable que pour les bâtiments dont l'altitude ne dépasse pas les 2000 m. Cette condition est considérée comme respectée pour l'ensemble des projets étudiés.

- Accumulation de neige non prise en compte

La prise en compte des accumulations de neige est requise lors du dimensionnement d'une structure. Des quantités plus importantes de neige peuvent se trouver au niveau des noues d'une toiture ou des acrotères. Leur prise en compte nécessite de connaître la géométrie exacte de la toiture ce qui n'est pas forcément le cas lors de l'utilisation de la méthode de conception développée. En prédimensionnement, la non-prise en compte des accumulations de neige par les modules est justifiée.

Finalement, les modules calculent une charge de neige en toiture en fonction seulement de la localisation du site de construction et de son altitude.

La détermination des charges dues au vent s'effectue à partir de l'*Eurocode 1 partie 1.4* (AFNOR 2010b) et de son annexe nationale (AFNOR 2008d). Le calcul est plus complexe que pour la neige et amène normalement à considérer de nombreux cas de charge. La démarche de prédimensionnement permet de simplifier le problème en retenant seulement les deux cas les plus défavorables. Une charge de vent verticale ascendante et une autre descendante sont finalement considérées. La formule suivante permet de déterminer les charges dues au vent :

$$W_v = q_p(z) \times (C_{pe} - C_{pi}) \quad [E. 2]$$

où :

- W_v est la charge de vent ;
- $q_p(z)$ est la pression dynamique de pointe à la hauteur z correspondant à la hauteur du bâtiment ;
- C_{pe} est le coefficient de pression extérieure ;
- C_{pi} est le coefficient de pression intérieure.

D'après l'annexe nationale, lorsque la perméabilité du bâtiment n'est pas connue avec certitude, les valeurs des coefficients de pression intérieure à considérer sont 0,2 et -0,3. Dans le cas de la charge de vent descendante, la valeur la plus défavorable de -0,3 est considérée. Pour la charge de vent ascendante, c'est la valeur de 0,2 qui est retenue.

$$W_p = q_p(z) \times (C_{pe} + 0,3)$$

$$W_d = q_p(z) \times (C_{pe} - 0,2)$$

[E. 3]

où :

- W_p est la charge de vent descendante qui exerce une pression sur la toiture ;
- W_d est la charge de vent ascendante qui exerce une dépression sur la toiture.

Pour le choix des coefficients de pression extérieure, l'hypothèse est faite que la toiture-terrasse possède des rives à arêtes vives. Si des acrotères, des rives arrondies ou des brisis mansardés sont considérés il est nécessaire de connaître de manière précise leur géométrie. Les modules considèrent alors de manière sécuritaire des rives à arêtes vives. La toiture est divisée en zones comme le montre l'illustration suivante pour lesquelles les coefficients de pression extérieure sont différents.

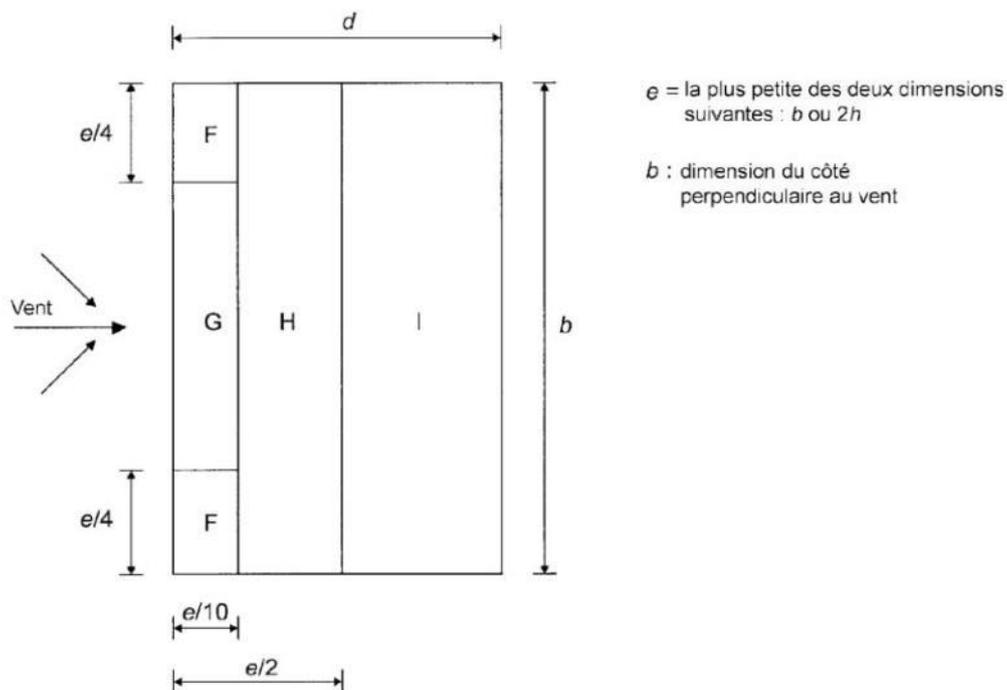


Illustration 1 : Zonage d'une toiture-terrasse pour la détermination des coefficients de pression extérieure nécessaire au calcul des charges de vent (AFNOR 2010b)

Le tableau suivant permet de déterminer pour les toitures-terrasses possédant des rives à arêtes vives les coefficients de pression extérieure de chaque zone.

Tableau 23 : Valeurs des coefficients de pression extérieure pour une toiture-terrasse possédant des rives à arêtes vives (AFNOR 2010b)

Type de toiture	Zone							
	F		G		H		I	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
rives à arêtes vives	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+ 0,2	
							-0,2	

Dans le tableau précédent, sont indiquées les valeurs $C_{pe,10}$ et $C_{pe,1}$. La première désigne le coefficient de pression extérieure à considérer lorsque l'élément étudié reprend la charge de vent en toiture sur une surface supérieure ou égale à 10 m². La seconde valeur est à retenir pour des éléments reprenant les charges de vent sur une surface inférieure ou égale à 1 m². Pour les autres cas, une interpolation est à effectuer pour déterminer la valeur du coefficient de pression extérieure à considérer. Les valeurs négatives représentent une charge de vent ascendante et celles positives une charge descendante. Dans le cadre de l'élaboration des modules, ce sont les valeurs les plus défavorables qui sont retenues. Pour le vent en dépression, la valeur de -2,5 pour le coefficient de pression extérieure est considérée. La valeur de 0,2 est retenue pour le vent en pression.

$$\begin{aligned}
 W_p &= q_p(z) \times (0,2 + 0,3) = 0,5 \times q_p(z) \\
 W_d &= q_p(z) \times (-2,5 - 0,2) = -2,7 \times q_p(z)
 \end{aligned}
 \tag{E. 4}$$

La détermination de la valeur de la pression dynamique de pointe passe tout d'abord par la connaissance de la vitesse de référence du vent qui est calculée à partir de l'expression suivante :

$$v_b = c_{dir} \times c_{season} \times v_{b,0}$$

[E. 5]

où :

- v_b est la vitesse de référence du vent à une hauteur de 10m au-dessus d'un sol où la végétation est basse avec ou non présences d'obstacles éloignés les uns des autres ;
- c_{dir} est le coefficient de direction pris égal à 1 de manière sécuritaire ;
- c_{season} est le coefficient de saison pris égal à 1 pour les situations de projet durable ;
- $v_{b,0}$ est la valeur de base de la vitesse du vent de référence.

La valeur de $v_{b,0}$ est donnée par l'annexe nationale en fonction de la localisation du bâtiment. Connaissant la vitesse de référence du vent, la vitesse moyenne du vent est calculée par l'équation qui suit :

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) \times v_b$$

[E. 6]

où :

- $v_m(z)$ est la vitesse moyenne du vent à une hauteur z au-dessus du sol ;
- $c_r(z)$ est le coefficient de rugosité qui permet de prendre en compte la variabilité de la vitesse moyenne du vent ;
- $c_o(z)$ est le coefficient orographique pris égal à 1 comme dans la majorité des cas ; Il prend en compte la dénivellation du terrain.

Afin de déterminer la valeur du coefficient de rugosité, une hypothèse est faite. Comme c'est le cas pour la majorité des constructions multiétages, le bâtiment est considéré se situer en zone urbaine. Une rugosité de type IV est alors affectée au site de construction. Dans ce cas, le coefficient de rugosité se calcule comme suit :

$$c_r(z) = \begin{cases} k_r \times \ln\left(\frac{z}{1}\right) & \text{pour } 10\text{m} \leq z \leq 200\text{m} \\ k_r \times \ln\left(\frac{10}{1}\right) & \text{pour } z \leq 10\text{m} \end{cases}$$

[E. 7]

où $k_r = 0,234$ est le facteur de terrain pour une catégorie de rugosité IV.

Le calcul de la pression dynamique de pointe nécessite la connaissance d'un paramètre supplémentaire qui est nommé intensité de la turbulence et qui se détermine pour un terrain de catégorie de rugosité IV à partir de la formule suivante :

$$I_v(z) = \begin{cases} \frac{k_t}{c_o(z) \times \ln(z/1)} & \text{pour } 10\text{m} \leq z \leq 200\text{m} \\ \frac{k_t}{c_o(z) \times \ln(10/1)} & \text{pour } z \leq 10\text{m} \end{cases} \quad [\text{E. 8}]$$

où $k_t = 0,8542$ est le coefficient de turbulence pour un terrain de catégorie de rugosité IV.

Finalement, la pression dynamique de pointe se calcule en utilisant l'équation qui suit :

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \times I_v(z) \right] \times \frac{1}{2} \times \rho_{air} \times v_m(z)^2 \quad [\text{E. 9}]$$

où $\rho_{air} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ est la masse volumique de l'air.

En considérant l'ensemble des hypothèses faites, les modules sont en mesure de déterminer les charges de vent en toiture en considérant seulement la région de vent correspondant au lieu de construction et la hauteur du bâtiment.

Détermination des charges de vent sur les murs

Le calcul des charges de vent sur les murs est identique à celui décrit précédemment. De la même manière, des hypothèses ont dû être faites afin de déterminer les sollicitations horizontales dues au vent. Le calcul s'effectue également à partir de l'*Eurocode 1 partie 1.4* (AFNOR 2010b) et de son annexe nationale (AFNOR 2008d). Pour appliquer la méthode décrite, le bâtiment est supposé posséder une base rectangulaire. Lors du dimensionnement d'une structure, de nombreux cas de charges sont à considérer. Pour la réalisation des modules, c'est le cas le plus défavorable qui est retenu. Que le vent agisse en pression ou dépression n'a pas d'influence sur la manière dont le mur est sollicité. C'est alors la charge dont la valeur absolue est la plus défavorable qui est considérée. Celle-ci se détermine à partir de la formule suivante :

$$W_v = q_p(z) \times (C_{pe} - C_{pi}) \quad [\text{E. 10}]$$

où :

- W_v est la charge de vent ;
- $q_p(z)$ est la pression dynamique de pointe à la hauteur z correspondant à la hauteur du bâtiment ;
- C_{pe} est le coefficient de pression extérieure ;
- C_{pi} est le coefficient de pression intérieure.

Les valeurs des coefficients de pression extérieure à considérer pour les murs verticaux sont données par l'*Eurocode 1 partie 1.4* (AFNOR 2010b), elles figurent dans le tableau qui suit :

Tableau 24 : Valeurs des coefficients de pression extérieure pour les murs verticaux (AFNOR 2010b)

Zone	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$								
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,5
≤ 0,25	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0		-0,3

Le zonage permet de prendre en compte l'orientation du vent et son influence sur les valeurs des coefficients. h/d représente le rapport entre la hauteur du bâtiment et sa dimension parallèle à la direction du vent. Les valeurs $c_{pe,10}$ et $c_{pe,1}$ désignent respectivement le coefficient de pression extérieure à considérer lorsque l'élément étudié reprend la charge de vent en toiture sur une surface supérieure ou égale à 10 m² et la valeur à retenir pour des éléments reprenant les charges de vent sur une surface inférieure ou égale à 1 m². D'après l'annexe nationale, lorsque la perméabilité du bâtiment n'est pas connue avec certitude, les valeurs des coefficients de pression intérieure à considérer sont 0,2 et -0,3. Finalement, quelle que soit la valeur du rapport h/d , la combinaison des coefficients la plus défavorable intègre les valeurs de -1,4 pour le coefficient de pression extérieure de la zone A et de 0,2 pour le coefficient de pression intérieure. La charge de vent résultante exerce alors une sollicitation en dépression dirigée vers l'extérieur du bâtiment.

$$W_v = q_p(z) \times (-1,4 - 0,2) = -1,6 \times q_p(z) \quad [E. 11]$$

La hauteur de référence z à laquelle doit être calculée la pression dynamique de pointe correspond à la hauteur du bâtiment lorsque la zone A est étudiée. Le calcul s'effectue de la même manière que décrite dans la méthode de détermination des charges de vent en toiture. La vitesse de référence du vent est tout d'abord calculée. Cette valeur permet le calcul de la vitesse moyenne du vent qui est réalisé en faisant l'hypothèse d'un bâtiment situé en zone urbaine correspondant à une catégorie de rugosité IV. L'intensité de la turbulence est également calculée pour une catégorie de rugosité IV. Cette intensité et la vitesse moyenne du vent permettent finalement la détermination de la pression dynamique de pointe à la hauteur de référence z

En considérant l'ensemble des hypothèses faites, les modules sont en mesure de déterminer les charges de vent sur les murs en considérant seulement la région de vent correspondant au lieu de construction et la hauteur du bâtiment.

Annexe F Principe de fonctionnement de quelques métaheuristiques

Recherche Locale Itérative (*Iterative Local Search*)

La méthode de recherche locale itérative est une méthode élémentaire de recherche directe (Lourenço et al. 2001). Elle est composée des quatre étapes suivantes :

1. Initialiser aléatoirement une première solution \vec{X}_0 ,
2. Choisir une solution \vec{X}' du voisinage V_{ois} de \vec{X} (pour la première itération $\vec{X} = \vec{X}_0$),
3. Evaluer la valeur de la fonction-objectif à minimiser pour la solution \vec{X}' ,
4. Comparer la valeur de la solution \vec{X}' avec celle de \vec{X} . Soit une fonction-objectif f à minimiser, si $f(\vec{X}') < f(\vec{X})$ alors poser $\vec{X} = \vec{X}'$, sinon \vec{X} est conservée,
5. Retourner à l'étape 2 jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

L'avantage principal de cette méthode est sa grande simplicité de mise en œuvre. Par contre, la solution finale peut rester bloquée proche d'un optimum local. La Figure 103 permet d'illustrer ce fait. Le voisinage de \vec{X}' , $V_{ois}(\vec{X}')$, ne permet pas de réaliser une recherche dans le voisinage de l'optimum global.

L'efficacité de cette méthode dépend de la solution initiale et du voisinage. Si le voisinage de la solution \vec{X} correspondait à l'espace complet des solutions, cette méthode s'apparenterait à de la recherche aléatoire itérative. La solution initiale aurait alors moins d'importance sur le résultat de l'optimisation puisque celle-ci sera avant tout basée sur l'exploration de l'espace. Par contre si le voisinage est petit la solution initiale aura beaucoup d'impact sur la solution finale, car l'optimisation sera principalement orientée sur l'exploitation des solutions voisines.

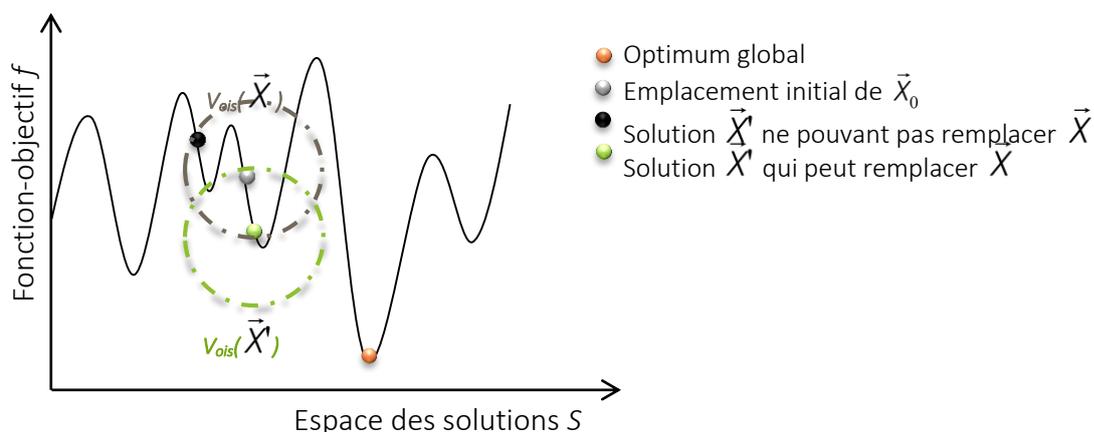


Figure 103 : Illustration du principe de la recherche locale itérative

Recuit Simulé (Simulated Annealing)

Développée par Kirkpatrick et al. (1982) et Černý (1985), la méthode du Recuit Simulé s'inspire de la technique du recuit employée par les métallurgistes. Le recuit d'une pièce métallique est un procédé correspondant à un cycle de chauffage, maintien en température puis refroidissement progressif avec d'éventuels paliers permettant de modifier et d'améliorer les caractéristiques mécaniques d'un métal. Si cette température est abaissée trop rapidement, le matériau reste figé à son état initial, ce qui correspond à une trempe. La méthode du Recuit Simulé permet alors de franchir des minimums locaux en introduisant un paramètre de contrôle T inspiré de la consigne de température du recuit. Sous certaines conditions ce paramètre permet le déplacement de la solution \vec{X} vers une solution $\vec{X}' \in V_{ois}(\vec{X})$ plus mauvaise telle que $f(\vec{X}') > f(\vec{X})$. Ces conditions reposent sur une règle d'acceptation basée sur l'algorithme de Metropolis et al. (1953) qui permet d'échantillonner la fonction-objectif par le biais d'une distribution de Boltzmann. Les étapes du Recuit Simulé sont les suivantes :

1. Initialiser aléatoirement une première solution \vec{X}_0 .
2. Choisir une solution \vec{X}' du voisinage V_{ois} de \vec{X} (pour la première itération $\vec{X} = \vec{X}_0$).
3. Evaluer la valeur de la fonction-objectif à minimiser pour la solution \vec{X}' .
4. Tirer aléatoirement un nombre réel r compris entre 0 et 1.
5. Comparer la valeur de r à la fonction B correspondant à une distribution de Boltzmann
$$e^{-\frac{f(\vec{x})-f(\vec{x}')}{T}}$$
 ; si $r < B(T, \vec{X}, \vec{X}')$, alors \vec{X} devient \vec{X}' , sinon \vec{X} est conservée.
6. Mettre à jour la température T .
7. Retourner à l'étape 2 jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

Lorsque la température est élevée, la fonction B est proche de 1, la plupart des mouvements sont alors acceptés qu'ils dégradent ou non la solution s . Lorsque la température est basse, la fonction B est proche de 0, la plupart des mouvements qui dégradent la solution s sont alors refusés et l'algorithme se ramène à une recherche locale itérative. A température intermédiaire l'acceptation d'un mouvement qui dégrade la solution s est aléatoire.

Dans son livre sur les métaheuristiques, Siarry (2014b) dresse une liste d'avantages et d'inconvénient de la méthode du Recuit Simulé. Un premier avantage de cette méthode réside dans sa simplicité de mise en œuvre et d'adaptation à de nombreux problèmes d'optimisation. Un second avantage est l'obtention d'une solution de bonne qualité (minimum absolu ou bon minimum relatif à la fonction-objectif). En revanche les inconvénients sont le nombre important de paramètres à régler de façon empirique et un temps de calcul excessif dans certaines applications.

Recherche avec Tabous (*Tabu Search*)

Introduite en par Glover (1986) améliore la recherche locale itérative en utilisant une astuce de liste « taboue » pour éviter de rester coincer sur un minimum local. Lors du processus de recherche, le principe de la Recherche Tabou est de choisir à chaque itération la meilleure solution $\vec{X}' \in V_{ois}(\vec{X})$, même si elle dégrade la solution initiale telle que $f(\vec{X}') > f(\vec{X})$. Lorsqu'elle atteint un minimum local \vec{X} par rapport au voisinage $V_{ois}(\vec{X})$, la Recherche Tabou va donc se déplacer vers une solution \vec{X}' plus mauvaise que s. Le danger est alors de revenir à s immédiatement si $\vec{X} \in V_{ois}(\vec{X}')$. Pour éviter de retomber sur cette solution, une liste évolutive mémorise les dernières solutions visitées et interdit tout déplacement vers une solution de cette liste de solutions « taboues ». Les solutions ne demeurent dans cette liste que pour un nombre limité d'itérations. La liste T_{tabou} est donc une mémoire à court terme. L'ensemble $V_{ois}^{T_{tabou}}(\vec{X})$ contient donc toutes les directions et positions visitées qui ne sont pas taboues. La Recherche avec Tabous peut être décrite comme suit :

1. Initialiser aléatoirement une première solution \vec{X}_0 .
2. Évaluer l'ensemble des solutions dans le voisinage $V_{ois}^{T_{tabou}}(\vec{X})$ (pour la première itération $\vec{X} = \vec{X}_0$).
3. Choisir la solution \vec{X}' qui minimise $f(\vec{X}')$ dans le voisinage $V_{ois}^{T_{tabou}}(\vec{X})$.
4. Mémoriser la solution \vec{X}' ou les mouvements de \vec{X}' dans la liste T_{tabou} .
5. Retourner à l'étape 2 jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

Recherche à voisinage variable (*Variable Neighborhood Search*)

La méthode de Recherche à Voisinage Variable (RVV) développée par Mladenović et Hansen (1997) fait usage de plusieurs types de voisinages. Il s'agit donc de rechercher une solution dans un premier voisinage et si ce voisinage ne permet pas d'améliorer la solution le voisinage est changé et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un voisinage améliore la solution \vec{X} , alors le processus est rebouclé depuis le premier voisinage. La méthode peut être décrite comme suit : Soit $\{V_{ois}^{(1)}, \dots, V_{ois}^{(T)}\}$ une liste finie de voisinages, où $V_{ois}^{(i)}(\vec{X})$ est l'ensemble des solutions dans le $i^{ième}$ voisinage de \vec{X} .

1. Initialiser aléatoirement une première solution \vec{X}_0 .
2. Tirer aléatoirement une solution \vec{X}' dans le voisinage $V_{ois}^{(i)}(\vec{X})$ (pour la première itération $\vec{X} = \vec{X}_0$ et $i=1$).
3. Evaluer la valeur de la fonction-objectif à minimiser pour la solution \vec{X}' .
4. Comparer la valeur de la solution \vec{X}' avec celle de \vec{X} . Soit une fonction-objectif f à minimiser, si $f(\vec{X}') < f(\vec{X})$ alors poser $\vec{X} = \vec{X}'$, sinon \vec{X} est conservée.
5. Poser $i = i+1$ si $i < T$, sinon poser $i=1$.

6. Retourner à l'étape 2 jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

Le fait d'utiliser plusieurs voisinages permet de diversifier la recherche de solution. Le temps de manipulation dépend du nombre de voisinages.

Optimisation par colonies de fourmis (*Ant Colony Optimisation*)

L'optimisation par colonies de fourmis a été initialement proposée par Colorni et al. (1991). C'est une méthode évolutive basée sur le comportement des fourmis à la recherche de nourriture. L'objectif des fourmis est de déterminer le chemin le plus court entre leur nid et une source de nourriture. Pour cela elles font usage de la phéromone, substance déposée sur le sol lorsqu'elles se déplacent. Si une fourmi doit choisir entre deux directions, elle choisit avec une plus grande probabilité celle comportant une plus forte concentration de phéromone. Colorni et al. illustrent ce phénomène à partir de la Figure 104. Les fourmis vont du point A au point E selon un déplacement rectiligne (a), quand soudain, un obstacle apparaît. Les fourmis contournent alors l'obstacle en prenant les chemins ABCDE et ABHDE (b). Le chemin ABCDE étant le plus court, le dépôt de phéromone s'intensifie sur ses segments et les fourmis finissent par opter pour celui-ci (c).

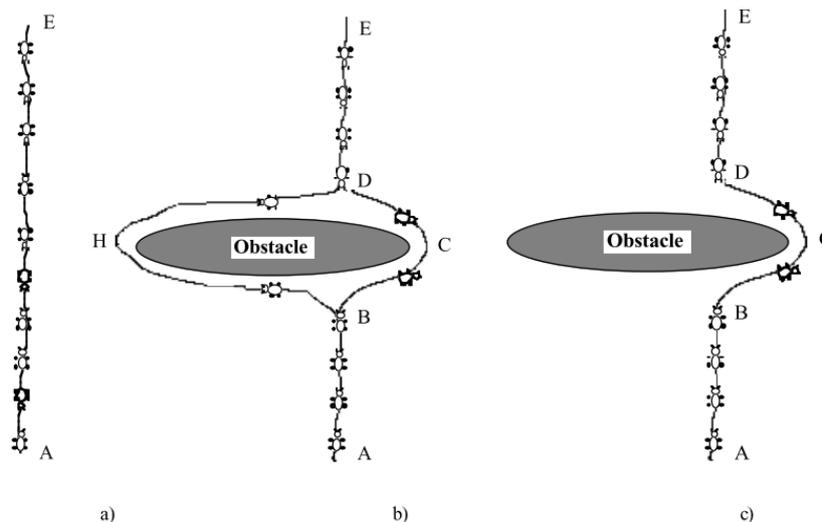


Figure 104 : Illustration du chemin le plus court entre la fourmière et la nourriture (Colorni et al. 1991)

Cette technique d'optimisation distribuée est assimilable à une population d'individus (fourmis) qui à chaque itération construisent chacune une solution globale (chemin). Cette solution globale (chemin) est une séquence de solutions partielles (chemins partiels empruntés). Soit N_i^k l'ensemble des décisions possibles que peut prendre une fourmi k placée en i pour compléter une solution partielle. La décision $d_j \in N_i^k$ qu'elle choisira dépendra de deux facteurs, à savoir la *visibilité* et la *quantité de phéromone* (Monmarché 2014) :

- la *visibilité* est une valeur η_{ij} représente l'intérêt d'une fourmi placée en i à prendre la décision d_j . Plus cette valeur est grande, plus il semble intéressant de faire le choix d_j ;
- la *quantité de phéromone* τ_{ij} représente l'intérêt historique qu'a la fourmi placée en i à prendre la décision d_j . Plus cette quantité est grande, plus il a été intéressant de prendre cette décision par le passé.

Finalement, la probabilité que la fourmi k placée en i prenne la décision d_j est définie selon l'équation suivante :

$$p_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}(t)^\alpha \times \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_{il}(t)^\alpha \times \eta_{il}^\beta} \quad [\text{F. 1}]$$

où α et β sont deux paramètres permettant de régler l'influence relative des phéromones et de la visibilité.

Le processus est alors le suivant :

1. Initialiser les phéromones $(\tau_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$.
2. Construire une solution globale T^k pour chaque fourmi k en tenant compte de la quantité de phéromone et de la visibilité.
3. Mettre à jour la quantité de phéromone et la meilleure solution rencontrée.
4. Retourner à l'étape 2 jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

La mise à jour de la quantité de phéromone est réalisée comme suit :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \times \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta_{ij}^k \quad [\text{F. 2}]$$

avec $\Delta_{ij}^k = \begin{cases} 1 / f(T^k(t)) & \text{si la fourmi a pris la décision } d_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

où :

- $\rho \in [0,1]$ est un paramètre d'évaporation ;
- m est le nombre de fourmis ;
- f est la fonction à optimiser ;
- Δ_{ij}^k est la quantité de phéromone déposée par la fourmi k sur les chemins partiels (i,j) qu'elle a empruntés.

La quantité de phéromone déposée par la fourmi k sur les chemins partiels qu'elle a empruntés est alors proportionnelle à la qualité de la solution.

Les algorithmes évolutionnaires (*Evolutionary Algorithm*)

Les algorithmes évolutionnaires s'inspirent de la théorie de l'évolution de Darwin portant sur la transformation générationnelle des espèces vivantes par des modifications génétiques (Darwin 1859). Trois approches d'optimisation provenant de cette théorie ont émergé indépendamment jusqu'à la fin des années 1990 (Pétrowski and Sana Ben Hamida 2014) :

- les stratégies d'évolution (*evolution strategies*) (Rechenberg 1965) ;
- la programmation évolutionnaire (*evolutionary programming*) (Fogel et al. 1997) ;
- les algorithmes génétiques (*genetic algorithms*) ont été présentés en 1975 par Holland (1992). Ces algorithmes sont devenus très populaires à la suite des travaux de Goldberg (1989).

Le principe générique des algorithmes évolutionnaires est le suivant (Pétrowski and Sana Ben Hamida 2014) : chacune des solutions de l'espace de recherche du problème d'optimisation représente un *individu*. L'ensemble des individus traités simultanément par l'algorithme évolutionnaire constitue une *population*. En appliquant certaines opérations, cette population évolue à chaque itération. La population de *parents* engendre donc une nouvelle population d'*enfants* devenant elle-même une population de *parents* à l'itération suivante. Deux types d'opérateurs peuvent alors se distinguer : les opérateurs de sélections (*sélection* et *remplacement*) et les opérateurs de variation (*mutation* et *croisement*). Un algorithme évolutionnaire est donc constitué des phases suivantes :

1. Initialiser une population de μ individus.
2. Évaluer la valeur de la fonction-objectif à optimiser dans les n dimensions pour chacun des μ individus.
3. Sélectionner λ parents parmi les μ individus.
4. Réaliser les opérations de croisements et mutations sur les λ individus et génération de λ enfants.
5. Évaluer les valeurs de la fonction-objectif à optimiser des λ enfants et des μ parents.
6. Sélectionner et remplacer les individus en ne gardant que μ individus.
7. Retourner à l'étape 2 jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

Le cas particulier des algorithmes génétiques fait intervenir les notions de *génotype* ou de *chromosome* qui représentent un individu et les notions de *gènes* qui sont les éléments constituant le *génotype* et qui représentent les variables. Chaque variable peut alors prendre une valeur qui correspond à des *allèles*. Enfin le *phénotype* permet de décoder le *génotype* pour l'évaluation des performances des individus.

Optimisation par Essaim Particulaire (*Particle Swarm Optimization*)

Cet algorithme d'optimisation est décrit dans le Chapitre V page 166 du présent manuscrit.

Annexe G Caractéristiques des matériaux et composants utilisés pour l'optimisation du cas d'étude

Les caractéristiques des matériaux utilisés pour l'optimisation du cas d'étude sont détaillées dans le Tableau 25 pour les données environnementales, dans le Tableau 26 pour les caractéristiques thermiques des menuiseries considérées et dans le Tableau 27 pour les caractéristiques thermiques des isolants.

Tableau 25 : Energie grise et potentiels de réchauffements climatiques issus de FDES et utilisés pour le cas d'étude

DESCRIPTION	Eg [MJ/m ³]	Prc [kgCO ₂ equ/m ³]
Chape fluide béton	<i>Eg_chape</i> 3220	<i>Prc_chape</i> 388
Dalle pleine béton armé C25 XF1 autoplaçant	<i>Eg_Beton</i> 3185	<i>Prc_Beton</i> 385
Poutre en bois lamellé collé ³⁶	<i>Eg_BLC</i> 6205 <i>Eg_CLT</i>	<i>Prc_BLC</i> 85 <i>Prc_CLT</i>
Bois de structure	<i>Eg_bois</i> 3073	<i>Prc_bois</i> -361 ³⁷
Panneau lamelles de bois orientées OSB de type2	<i>Eg_OSB</i> 7250	<i>Prc_OSB</i> -518 ³⁷
Laine de roche	<i>Eg_LDR</i> 4320 ³⁸ (2160)	<i>Prc_LDR</i> 310 ³⁸ (155)
Plaque de plâtre BA13	<i>Eg_BA</i> 7524 ³⁸ (3762)	<i>Prc_BA</i> 392 ³⁸ (196)
Plaque de fibre-gypse	<i>Eg_ferm</i> 22880 ³⁸ (11440)	<i>Prc_ferm</i> 1172 ³⁸ (585)
Polystyrène plancher bas	<i>Eg_poly</i> 4964 ³⁸ (2482)	<i>Prc_poly</i> 280 ³⁸ (140)
Laine de verre 32	<i>Eg_LDV32</i> 2056 (1028)	<i>Prc_LDV32</i> 70 (35)
Laine de verre 35	<i>Eg_LDV35</i> 1276 (638)	<i>Prc_LDV35</i> 44 (22)
Polystyrène extrudé PSE	<i>Eg_PSE</i> 2558 (1279)	<i>Prc_PSE</i> 187 (94)
DESCRIPTION	Eg [MJ/m ²]	Prc [kgCO ₂ equ/m ²]
Double vitrage	<i>Eg_DV</i> 1364 ³⁹ (455)	<i>Prc_DV</i> 94 ³⁹ (31)
Double vitrage avec traitement solaire	<i>Eg_DVS</i> 1767 ³⁹ (589)	<i>Prc_DVS</i> 126 ³⁹ (42)
Triple vitrage	<i>Eg_TV</i> 2214 ³⁹ (738)	<i>Prc_TV</i> 150 ³⁹ (50)
Bardage acier	<i>Eg_rev_LDV</i> 314 ³⁸ (157)	<i>Prc_rev_LDV</i> 20 ³⁸ (10)
Enduit extérieur	<i>Eg_rev_PSE</i> 96 ³⁸ (48)	<i>Prc_rev_PSE</i> 5 ³⁸ (3)

³⁶ Données également utilisées pour le CLT car il n'y a pas de FDES correspondante

³⁷ Les valeurs dont le signe est négatif signifient qu'il y a eu un prélèvement de CO₂ de l'atmosphère supérieur aux émissions de CO₂ sur le cycle de vie du produit

³⁸ Ces matériaux ont une durée de vie de 50 ans, leur impact a donc été multiplié par deux pour tenir compte de leur renouvellement sur le cycle de vie du bâtiment

³⁹ Ces matériaux ont une durée de vie de 30 ans, leur impact a donc été multiplié par trois pour tenir compte de leur renouvellement sur le cycle de vie du bâtiment

Tableau 26 : Caractéristiques thermiques des différents vitrages considérés pour l'optimisation du cas d'étude

	U _w SUD [W/m ² .K]	S _w SUD [-]	U _w OUEST [W/m ² .K]	S _w OUEST [-]
Double vitrage	1,3	0,51	1,6	0,49
Double vitrage avec traitement solaire	1,3	0,29	1,6	0,27
Triple vitrage	1	0,48	1,3	0,46

Tableau 27 : Conductivité thermique des isolants considérés pour l'optimisation du cas d'étude

	λ [W/m.K]
Laine de verre 32	0,032
Laine de verre 35	0,035
Polystyrène extrudé PSE	0,03