
Méthode d'optimisation de systèmes constructifs bois adaptés aux bâtiments à très hautes performances énergétiques associant thermique et mécanique à des critères de faisabilité industrielle.

Stéphanie Armand Decker^{1,3}, Philippe Galimard¹, Amadou Ndiaye², Alain Sempey¹,
Thomas Garnesson³, Marie Pauly³, Jérôme Lopez³, Philippe Lagière^{1,3}, Frédéric Bos¹

¹ Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

CNRS, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

Arts et Métiers ParisTech, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France.

philippe.galimard@u-bordeaux.fr, alain.sempey@u-bordeaux.fr, frederic.bos@u-bordeaux.fr

² INRA, I2M, USC 1368, F-33400 Talence, France. amadou.ndiaye@bordeaux.inra.fr

³ Nobatek-INEF4, F-64600 Anglet, France.

sdecker@nobatek.com, tgarnesson@nobatek.com, mpauly@nobatek.com, plagiere@nobatek.com

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. Afin d'optimiser la composition de l'enveloppe et du système constructif des bâtiments bois multi-étages en traitant simultanément les besoins de chauffage, l'inconfort thermique, le niveau de confort vibratoire des planchers intermédiaires et l'impact sur l'environnement, un processus d'optimisation multi-objectif par essaim particulaire a été mis en œuvre. Tout d'abord les objectifs à optimiser, les variables considérées et la méthodologie employée sont décrits. La modélisation des fonctions-objectif est ensuite réalisée.

ABSTRACT. A multi-objective particle swarm optimisation process is implemented in order to optimise the composition of the envelope and the constructive multi-storey wood building system by considering simultaneously heating needs, thermal discomfort, intermediate floor vibration comfort level and environmental impact. First, the objectives to optimise, the variables and the methodology are described. Secondly, the modelling of objective-functions is performed.

MOTS-CLÉS : optimisation multi-objectif, OEP, bâtiments bois, confort vibratoire des planchers, méta-modèle, éco-conception.

KEY WORDS: multi-objective optimisation, PSO, timber buildings, floor vibration, meta-model, eco-design.

1. Introduction

La croissance mondiale de la population induit une augmentation continue de l'utilisation des matières premières minérales et des énergies fossiles. En conséquence, le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources non renouvelables s'accroissent considérablement. Cela a conduit à une forte prise de conscience des pays industrialisés qui cherchent à réduire la consommation d'énergie et à utiliser des matières premières de substitution, notamment renouvelables. Pourtant, le bois, matériau renouvelable, à faible potentiel de réchauffement climatique et rapide à mettre en œuvre (filière sèche et préfabrication) reste actuellement peu développé dans le bâtiment. Malgré ses nombreux avantages et l'inexistence de véritables freins réglementaires, le développement de la construction bois multi-étage est ralenti par un manque de formation, de connaissance et d'ingénierie, et également par des obstacles culturels et économiques qui rendent sa compétitivité difficile [FCB 09]; [GAB 12]. Pour promouvoir son usage, le développement de méthodes et outils favorisant le recours au bois dans des systèmes constructifs pour la construction multi-étage devient alors nécessaire.

Dans ce type de construction se pose la question de la composition des planchers intermédiaires et de l'obtention d'un confort vibratoire convenable pour une épaisseur de plancher nécessaire et suffisante. Un premier travail a donc été réalisé afin d'optimiser un plancher bois en maximisant son confort vibratoire tout en minimisant son épaisseur finale, son énergie grise et son potentiel de réchauffement climatique tout au long de son cycle de vie afin d'améliorer aussi son impact environnemental. Le plancher intermédiaire a été optimisé à l'échelle de la paroi, sans considérer son impact sur les besoins de chauffage ni sur l'inconfort thermique estival du bâtiment. Les solutions obtenues n'ont donc pas fait apparaître l'intérêt d'augmenter l'inertie thermique du plancher intermédiaire. D'autres travaux d'optimisation du système constructif bois permettant, en plus des objectifs abordés pour les planchers intermédiaires, de minimiser les besoins de chauffage et l'inconfort thermique estival d'un bâtiment multi-étage s'avèrent nécessaires.

Le travail présenté ici vise l'optimisation multi-objectif de la composition de l'enveloppe et du système constructif (**Figure 1**) de bâtiments bois multi-étages en tenant compte de compromis entre des objectifs de besoins de chauffage, de confort thermique d'été, de confort, de potentiel de réchauffement climatique et d'énergie grise.

2. La conception d'enveloppes bois, un problème d'optimisation multi-objectif à variables mixtes

2.1. L'approche d'optimisation multi-objectif

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 [PER 11] 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. Ces contradictions traduisent le fait qu'il n'existe pas une solution optimale au regard de ces cinq objectifs pris séparément mais des compromis optimaux. Habituellement, dans des problèmes d'optimisation multi-objectifs, l'une des deux stratégies ci-dessous est utilisée :

- La méthode d'agrégation : une fonction pondérée intégrant l'ensemble des objectifs est optimisée en mono-objectif qui conduit à une solution unique [REY 06, WAN 03].
- La méthode d'optimisation multi-objectif avec l'obtention d'un ensemble de solutions optimales qui sont les meilleurs compromis selon la dominance au sens de Pareto entre les objectifs. [DEB 99 ; VAN 00 ; REY 06 ; NDI 09]. Cet ensemble de solutions non dominées constitue un front dit de Pareto au sein duquel le concepteur ou décideur peut faire un choix.

Le choix a été porté sur l'obtention d'un ensemble de compromis optimaux parmi lesquels des choix pourront être faits par le décideur sur d'autres critères, p. ex. économiques, sociétaux, environnementaux, ou de flexibilité. L'utilisation d'une méthode d'optimisation par agrégation, par le fait qu'elle donne un optimum unique, ne permet pas cette phase de décision.

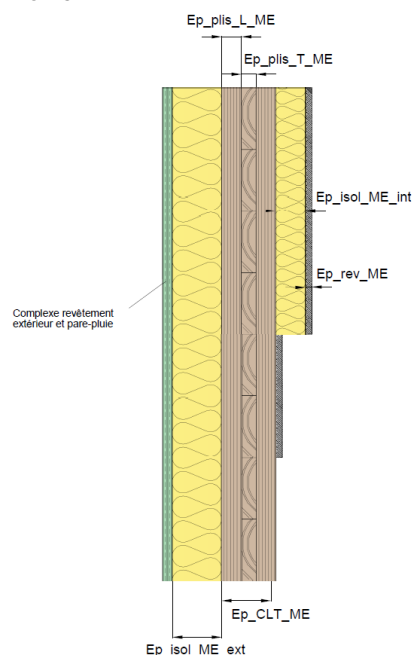
En dimensionnement des structures, deux types de critères sont vérifiés : les Etats Limites Ultimes (ELU) regroupent les critères qui ont trait à la sécurité des personnes et les Etats Limites de Service (ELS) qui font référence aux critères relatifs à l'aptitude au service de la construction principalement en ce qui concerne le confort des occupants. Afin d'assurer la sécurité de l'ouvrage et son aptitude au service, l'optimisation des cinq objectifs nécessite également la prise en compte de ces contraintes mécaniques. Des calculs de pré-

dimensionnement des planchers, murs et toitures bois sont donc réalisés selon des critères dimensionnant précisés dans l'Eurocode 5 tels que la limite acceptable du confort vibratoire et la résistance au feu. Cette norme traite du dimensionnement des structures en bois [AFN 12]. Les compromis ne respectant pas ces contraintes devront être éliminés.

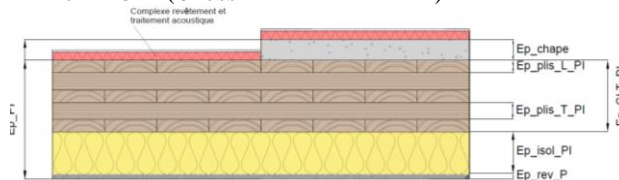
2.2. Les solutions constructives et variables de conception

Le CLT est un système constructif reconnu et qui a déjà fait ses preuves parmi les plus hauts bâtiments bois du monde comme le « *Stadthaus* » à Londres et « *Forte Living* » à Melbourne [WAU 10]. Ce système constructif a donc été privilégié dans cette étude (**Figure 1**). Pour obtenir les compromis optimaux, plusieurs variables de conception sont considérées (**Tableau 1**). Le type de plancher est ici une variable discrète de l'optimisation. Le plancher peut donc être un plancher constitué d'une dalle béton, un plancher à solives ou un plancher constitué de panneaux bois lamellés croisés (plancher CLT). D'autres variables discrètes et continues sont considérées telles que l'entraxe, l'épaisseur et la hauteur des solives pour les planchers à solives, le nombre de plis et leur épaisseur pour chaque type de panneaux CLT, l'épaisseur de plâtre au niveau du plafond et des murs, l'épaisseur et le type des isolants thermiques et enfin l'épaisseur d'une éventuelle chape béton. Des variables relatives aux parois vitrées sont également prises en compte telles que le type de menuiseries et la profondeur des protections solaires.

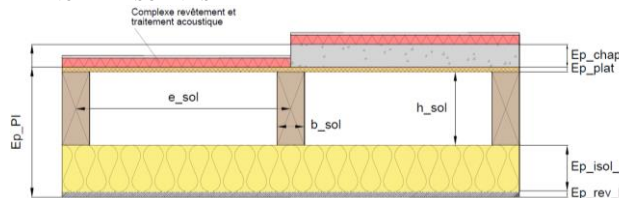
MUR CLT



PLANCHER CLT (CROSS LAMINATED TIMBER)



PLANCHER A SOLIVES



TOITURE A SOLIVES

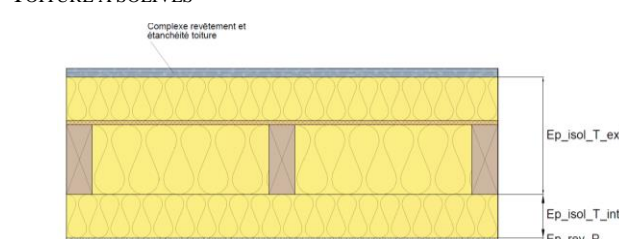


Figure 1. Composition de l'enveloppe et du système constructif

2.3. Optimisation par essaim particulaire

Le problème d'optimisation peut être qualifié de problème multi-objectif à variables mixtes (discrètes et continues). La méthode d'optimisation par essaim particulaire (OEP) [EBE 95], comme d'autres métaheuristiques, permet de trouver un ensemble de solutions optimales à un problème d'optimisation multi-objectif. La méthode OEP, motivée par la simulation du déplacement d'un groupe d'oiseau, s'est avérée très efficace dans divers problèmes d'optimisation difficiles [NDI 09]. Elle 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. Enfin l'OEP 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. L'OEP a donc été privilégiée dans ce travail pour optimiser simultanément les cinq objectifs contradictoires.

La méthode d'optimisation particulaire consiste à déplacer les éléments de l'essaim dans l'espace des solutions pour converger vers des compromis optimaux. Les particules se déplacent en fonction de leur propre position et de celles de leurs voisines [1], [2] et [3]. Le nombre de particules est défini a priori et le système est initialisé en attribuant aléatoirement une position à chaque particule de l'essaim. 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 position $x_i^t = (x_{i,1}^t, x_{i,2}^t, \dots, x_{i,n}^t)$ et vitesse $v_i^t = (v_{i,1}^t, v_{i,2}^t, \dots, v_{i,n}^t)$ sont actualisés pour chaque particule i à chaque itération t selon les équations [1] et [2] pour les variables continues et [3] et [4] pour les variables discrètes [EBE 95 ; MIC 09].

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1} \quad [1]$$

$$v_{i,j}^{t+1} = w \cdot v_{i,j}^t + c_1 r_1 (p_{i,j}^t - x_{i,j}^t) + c_2 r_2 (g_j^t - x_{i,j}^t) \quad [2]$$

$$\begin{aligned} x_{i,j}^{t+1} &= n_k \text{ si } \varphi_{k-1} < S(v_{i,j}^{t+1}) \\ &= n_l \text{ si } \varphi_{l-1} < S(v_{i,j}^{t+1}) \leq \varphi_l \text{ avec } l < l \leq k - 1 \\ &= n_1 \text{ si } \varphi_1 \geq S(v_{i,j}^{t+1}) \end{aligned} \quad [3]$$

$$S(v_{i,j}^{t+1}) = \frac{I}{1 + e^{-v_{i,j}^{t+1}}} \quad [4]$$

où $i = 1, 2, \dots, p$ et $j = 1, 2, \dots, n$ avec p le nombre de particule (taille de l'essaim) et n la dimension de l'espace de recherche ; $x_{i,j}^{t+1}$ est la position de la particule i à l'instant $t+1$ et $v_{i,j}^{t+1}$ sa vitesse; w représente le poids de l'inertie d'une particule; r_1 et r_2 sont des nombre aléatoires entre 0 et 1; c_1 et c_2 sont des constantes positives d'accélération; les φ_i sont des nombres aléatoires uniformément distribués entre 0 et 1 et strictement ordonnés ; les n_i sont les valeurs d'une variable discrète ; $p_{i,j}^t$ et g_j^t sont respectivement la meilleure position jamais visitées par la particule i et la meilleure position locale jamais visitée par une de ses voisines.

Dans notre problème les paramètres w ; c_1 et c_2 ont été respectivement fixés à 0,63 ; 1,45 et 1,45. La taille de l'essaim est de 600 particules et 200 itérations sont réalisées.

3. Modélisation des objectifs

Pour la traduction des objectifs en fonctions calculables, une phase de modélisation a été nécessaire. Les fonctions-objectif sont exprimées en fonction des variables de conception.

3.1. Objectifs mécaniques

La modélisation du confort vibratoire d'un plancher a été faite via des modules simplifiés de calcul analytique. Les planchers bois nécessitent un dimensionnement selon l'eurocode 5 [AFN 12] où trois critères de vérification doivent être respectés : la fréquence naturelle fondamentale du plancher (f) doit être supérieure à 8 Hz, la souplesse (a) doit être inférieure à 3 mm/kN et la vitesse impulsionnelle limite (v_{lim}) doit être inférieure à une valeur seuil (v_{max}) [5]. Quand il s'agit de planchers réalisés à partir de solives bois, la qualification du confort vibratoire (N_{vib}), s'appuie sur l'annexe nationale de l'Eurocode 5 [AFN 10]. Pour être en adéquation avec cette norme, quatre niveaux de confort (1, 2, 3 ou 4) ont alors été définis (voir équation [6]). Un cinquième niveau (0) permettant de qualifier les planchers présentant une performance accrue vis-à-vis du confort vibratoire a été ajouté.

$$f \geq 8Hz \text{ et } v_{lim} \leq v_{max} \quad [5]$$

$$N_{vib} = 0 : \text{Excellent pour } a \leq 0,5mm / kN \text{ et contraintes respectées}$$

$$N_{vib} = 1 : \text{Très bon pour } 0,5 < a < 1mm / kN \text{ et contraintes respectées}$$

$$N_{vib} = 2 : \text{Bon pour } 1 \leq a \leq 1,6mm / kN \text{ et contraintes respectées} \quad [6]$$

$$N_{vib} = 3 : \text{Moyen pour } 1,6 < a < 3mm / kN \text{ et contraintes respectées}$$

$$N_{vib} = 4 : \text{Inacceptable pour } a \geq 3mm / kN \text{ ou contraintes non respectées}$$

La qualification du confort vibratoire des planchers réalisés à partir de panneaux CLT est moins évidente que pour les planchers à solives. Aucune norme ne fait référence au confort vibratoire de ces planchers. La qualification du confort vibratoire (N_{vib}) des planchers CLT s'appuie alors sur les recommandations fournies dans le *Manuel CLT* [FPI 11] qui donne un critère de vérification en fonction de la fréquence naturelle fondamentale du plancher (f) et de sa souplesse (a) [7]. Les niveaux de confort considérés sont échelonnés

similairement à ceux des planchers à solives, selon la souplesse et le respect des critères [6]. Dans certaines configurations, ces planchers apportent une réponse efficace à la recherche de confort vibratoire. La fonction-objectif *confort vibratoire des planchers* ($F_{vibration}$) [8] va permettre de minimiser le niveau de confort.

$$\frac{f}{a^{0,7}} \geq 13 \quad [7]$$

$$F_{vibration} : \min(N_{vib}) \quad [8]$$

3.2. Objectifs thermiques

La fonction-objectif *besoin de chauffage* (Bch) consiste à minimiser les besoins de chauffage annuels du bâtiment étudié pour maintenir une consigne de température minimale fixée [9]. La fonction-objectif *inconfort thermique* (F_{Inconf}) consiste à minimiser la somme des degrés-heures (DH) de l'ensemble des zones d'un bâtiment [9]. Les degrés heures exprimés dans la norme NF EN 15251 mesurent l'accumulation par heure de l'écart de la température opérative par rapport à une température de référence [AFN 07]. La température de référence considérée va dépendre du type de bâtiment étudié. Elle peut être adaptative et évolutive au cours du temps.

$$F_{Bch} : \min(Bch) \quad \text{et} \quad F_{Inconf} : \min(DH) \quad [9]$$

Pour expliciter les degrés-heures et les besoins de chauffage, l'utilisation de modèles de simulation dynamique est nécessaire. Ces modèles prennent en compte toutes les variables d'entrée du bâtiment, tels que la performance thermique des matériaux, les données météorologiques annuelles, les périodes d'occupation et les usages. Cependant de tels modèles détaillés nécessitent quelques minutes pour estimer les performances thermiques d'un bâtiment. Les processus d'optimisation utilisant directement ces modèles induisent un temps de calcul important pouvant atteindre au minimum 30h par itération [WAN 05]. De plus 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 total une solution possible est d'utiliser un modèle de substitution appelé méta-modèle, soit 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 [EIS 12 ; MAG 10]. L'utilisation de polynômes du chaos (PC) à partir de modèles thermique provenant d'EnergyPlus (DOE: US Department of Energy) a été effectuée avec succès dans [MER 13] pour évaluer la propagation d'incertitudes. Pour cela un couplage du modèle avec une bibliothèque Python dédiée au traitement des incertitudes OpenTURNS © a été réalisé. Tandis que le modèle principal nécessitait 200 secondes pour évaluer les besoins de chauffage, l'utilisation de méta-modèles a permis d'évaluer plus de 2000 solutions en une seconde. Des méta-modèles issus de la décomposition en PC sont donc utilisés dans ce travail.

3.3. Objectifs environnementaux

Les fonctions-objectif *énergie grise de l'enveloppe* ($F_{energie}$) et *potentiel de réchauffement climatique de l'enveloppe* (F_{Prc}) [10] consistent respectivement à minimiser l'énergie grise (E_g) et le potentiel de réchauffement climatique (Prc) de l'enveloppe sur une durée de vie de 100 ans. Le modèle de l'énergie grise est celui proposé par l'ICEB (Institut pour la Conception Eco-responsable du Bâti) [ICE 12] : 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 sanitaires (FDES) réalisées selon la norme française NF P 01-010 [AFN 04].

$$F_{energie} : \min \left(\frac{\sum_i E_{g_i} * Q_i}{NB_niv * L_bat * Portee_PI} \right) \quad \text{et} \quad F_{Prc} : \min \left(\frac{\sum_i Prc_i * Q_i}{NB_niv * L_bat * Portee_PI} \right) \quad [10]$$

où E_{g_i} , Prc_i et Q_i sont respectivement l'énergie grise en kWh_{EP}/m³, le potentiel de réchauffement climatique en CO₂eq/m³ et la quantité en m³ du matériau i . $Portee_PI$ est la portée du plancher, L_bat , la longueur du bâtiment et NB_niv , le nombre de niveau du bâtiment.

4. Cas d'étude et solution de référence

La méthode développée a été implémentée sur un cas d'étude inspiré d'un bâtiment réel constitué de quatre logements collectifs (**Figure 1** et **Figure 3**). L'ensemble des variables de décision considérées dans cette étude sont décrites dans le **Tableau 1**. Ces variables ont été identifiées par la théorie, et l'expertise et par des analyses

de sensibilité réalisés à partir des méta-modèles de thermique. Pour pouvoir comparer les compromis optimaux calculés une solution de référence proche du bâtiment réel a également été étudié : Elle est constituée d'un plancher CLT recouvert d'une chape de 9cm, d'une épaisseur d'isolation extérieur de 14cm au niveau des murs et de 22cm au niveau de la toiture, de doubles vitrages et d'une casquette solaire de 2,2m. Les caractéristiques de cette configuration ont permis de calculer une valeur de référence pour chacune des fonctions-objectif considérées. Cela permettra de situer les compromis optimaux obtenus par optimisation multi-objectif par rapport à cette solution de référence (**Tableau 2**).

Tableau 1. Description des variables de décision

Variables	Description	Unité	Type de variable	Domaine de variation ou valeur
<i>Type_PI</i>	Type de plancher intermédiaire (PI)	-	Discrète	$Type_PI^* = \{\text{Béton ; CLT ; Solives}\}$
<i>nb_plis_PI</i>	Nombre de plis CLT	-	Discrète	$nb_plis_PI = \{3;5;7\}$
<i>h_plis_T_PI</i>	Épaisseur des plis CLT transversaux	m	Continue	$0,02 \leq h_plis_T_PI \leq 0,06$
<i>h_plis_L_PI</i>	Épaisseur des plis CLT longitudinaux	m	Continue	$0,02 \leq h_plis_L_PI \leq 0,08$
<i>h_plis_L_Pib</i>	Épaisseur des plis CLT extérieurs longitudinaux pour 5 plis	m	Continue	$0,02 \leq h_plis_L_Pib \leq 0,08$
<i>nb_rt</i>	Nombre de renfort	-	Discrète	$nb_rt = \{1;3;5;7\}$
<i>h_sol</i>	Hauteur des solives	m	Discrète	$h_sol = \{0,175;0,22;0,265;0,31;0,355;0,40\}$
<i>b_sol</i>	Épaisseur des solives	m	Discrète	$b_sol = \{0,07;0,09;0,1;0,11;0,12;0,14;0,16;0,21\}$
<i>e_sol</i>	Entraxe des solives	m	Discrète	$e_sol \in [0,3;1]$ avec discrétisation de 0,05
<i>Ep_chape</i>	Épaisseur de la chape béton	m	Continue	$0,4 \leq Ep_chape \leq 0,1$ ou $Ep_chape = 0$
<i>Ep_isol_T_ext</i>	Épaisseur de l'isolant extérieur	m	Continue	$0,1 \leq Ep_isol_T_ext \leq 0,3$
<i>Ep_isol_ME_ext</i>	Épaisseur de l'isolant extérieur	m	Continue	$0,06 \leq Ep_isol_ME \leq 0,2$
<i>Ep_rev_M</i>	Épaisseur de la plaque de plâtre du mur extérieur et des cloisons	m	Discrète	$Ep_rev_M = \{0,013;0,026\}$
<i>Type_isol_ME_ext</i>	Type d'isolant utilisé pour l'isolant	-	Discrète	$Type_isol_ME_ext^{**} = \{\text{Poly ; FDV32 ; FDV35}\}$
<i>Type_fen_S</i>	Type de fenêtre Sud	-	Discrète	$Type_fen_S^{***} = \{\text{DV ; DVsol ; TV}\}$
<i>Type_fen_O</i>	Type de fenêtre Ouest	-	Discrète	$Type_fen_O^{***} = \{\text{DV ; DVsol ; TV}\}$
<i>Prof_c</i>	Profondeur des protections solaires	m	Continue	$1,5 \leq Prof_c \leq 2,5$

*Trois types de plancher sont considérés : Béton avec une épaisseur de 0,2 m, CLT et à solives

**Trois types d'isolant : Polystyrène (Poly), Deux fibre de verre avec une conductivité thermique de 0,032 W/m².K (LDV32) et 0.035 W/m².K (FDV35)

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

5. Résultats et discussion

L'optimisation simultanée des *besoins de chauffage*, de l'*inconfort thermique* et du *potentiel de réchauffement climatique de l'enveloppe* a été effectuée. Les 436 solutions obtenues respectent les critères de pré-dimensionnement à l'Eurocode 5 et ont un niveau de confort vibratoire acceptable. L'avantage de n'avoir sélectionné que trois objectifs est que le front de Pareto, qui représente l'ensemble des solutions optimales peut être représenté selon les trois fonctions-objectif prises deux à deux (**Figure 2**). La solution de référence est dominée par d'autres solutions sur l'ensemble des objectifs (**Tableau 2**).

Quatre grand groupes de solutions peuvent être distingués : les solutions avec un plancher béton (111), avec plancher CLT comportant une chape (15), avec plancher à solives sans chape (118) et avec plancher à solives avec chape (192). Les meilleures solutions en terme de besoins de chauffage et d'inconfort thermique sont des solutions comportant un plancher béton ou un plancher CLT avec chape. Néanmoins en termes de potentiel de réchauffement climatique ce sont les solutions avec un plancher à solives sans chape qui sont les meilleures. Les alternatives utilisant un plancher à solives avec chape permettront éventuellement de faire des choix de compromis entre des critères techniques et environnementaux.

Tableau 2. Solution de référence et exemples de solutions sur le front de Pareto

<i>Type_PI</i> [-]	<i>Ep_chape</i> [cm]	<i>Bch</i> [kWh/m ² .an]	<i>DH</i> [°Ch]	<i>Prc</i> [kgCO _{2eq} /m ²]
CLT (Solution de référence)	9	10	635	229
Solives	5	8	603	215
CLT	10	13	191	281
Béton	20	14	219	264

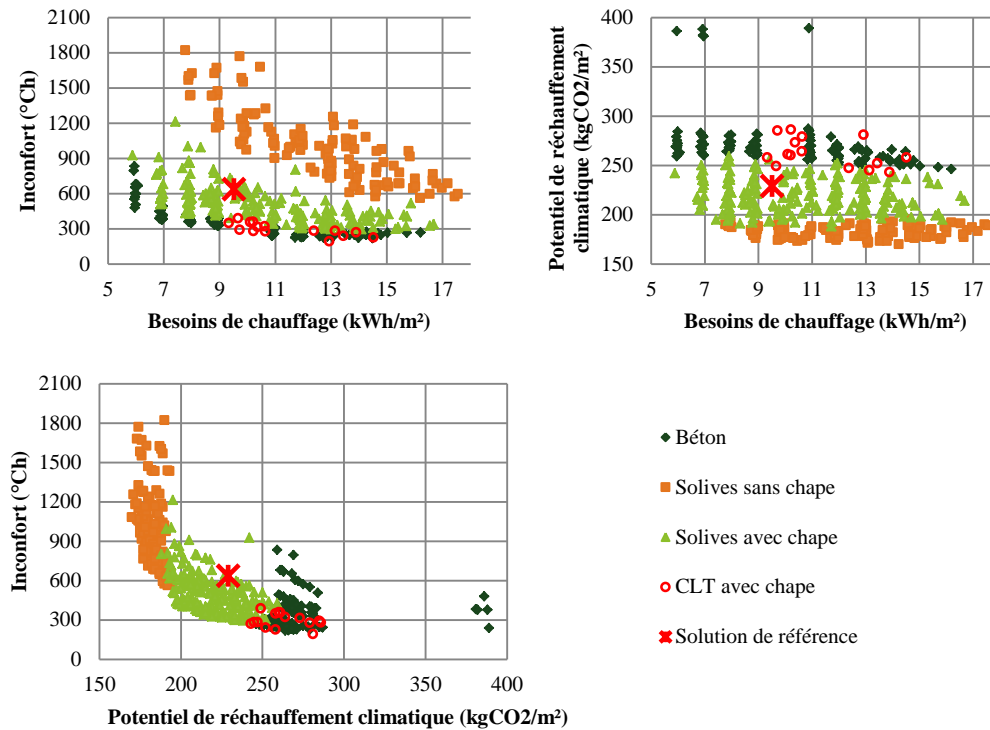


Figure 2 Représentation du front de Pareto

6. Conclusions et perspectives

Une méthodologie d'optimisation multi-objectif par essaim particulaire a été définie pour optimiser la composition de l'enveloppe et du système constructif de bâtiments bois multi-étages (Figure 3). Cinq fonctions-objectif ont été détaillées: les objectifs de mécanique et d'environnement –*confort vibratoire des planchers*, *énergie grise de l'enveloppe* et *potentiel de réchauffement climatique de l'enveloppe*– ont été modélisés. Les fonctions-objectif de thermique –*besoin de chauffage* et *inconfort thermique*– ont été méta-modélisées par les polynômes du chaos.

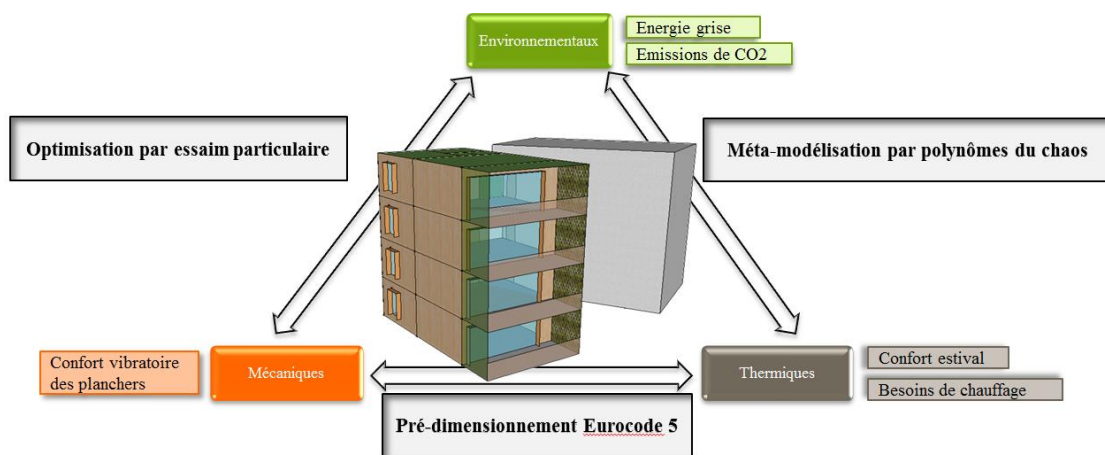


Figure 3 : Récapitulatif de la méthode d'optimisation

Un processus d'optimisation a été lancé pour l'optimisation simultanée des *besoins de chauffage*, de l'*inconfort thermique* et du *potentiel de réchauffement climatique de l'enveloppe*. Les résultats obtenus offrent une certaine diversité dans un panel de 436 solutions optimales, qui dominent la solution de référence, parfois même sur l'ensemble des objectifs concernés. Par la suite, l'utilisation d'une méthode d'aide à la décision permettra au décideur de faire un choix parmi ces nombreuses solutions.

L'approche de conception utilisée permet de considérer conjointement des disciplines généralement considérées séparément les unes des autres. Ce processus d'optimisation permet également d'obtenir des

solutions optimales qui n'auraient probablement pas été explorées avec le processus itératif généralement employé dans un bureau d'étude. Cette méthodologie permet donc d'offrir efficacement, une certaine diversité dans un panel de solutions optimales. Pour compléter cette méthodologie, d'autres objectifs traitant du confort acoustique et lumineux doivent également être considérés. Des méta-modélisations peuvent être envisagées pour modéliser ces fonctions-objectif additionnelles.

7. Bibliographie

- [AFN 04] AFNOR, Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction. *Norme française NF P 01-010*. Association française de normalisation (AFNOR), 2004.
- [AFN 07] AFNOR, 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. *Norme française NF EN 15251*. Association française de normalisation (AFNOR), 2007.
- [AFN 10] AFNOR, Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Généralités — Règles communes et règles pour les bâtiments-Annexe Nationale. *Norme française NF EN 1995-1-1 / NA*. Association française de normalisation (AFNOR), 2010.
- [AFN 12] AFNOR, Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois — Partie 1-1 : Généralités — Règles communes et règles pour les bâtiments. *Norme française NF EN 1995-1-1*. Association française de normalisation (AFNOR), 2012.
- [DEB 99] DEB K., « Multi-objective Genetic Algorithms: Problem Difficulties and Construction of Test Problems », *Evolutionary Computation*, vol. 7, n° 3 1999, p. 205-230.
- [EBE 95] EBERHART R., KENNEDY J., « A new optimizer using particle swarm theory », *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995, p. 39-43.
- [EIS 12] EISENHOWER B., O'NEILL Z., NARAYANAN S., FONOVEROV V. A., MEZIC I., « A methodology for meta-model based optimization in building energy models », *Energy and Buildings*, vol. 47, 2012, p. 292-301.
- [FCB 09] FCBA and CSTB, Développement de l'usage du bois dans la construction : Obstacles Réglementaires & Normatifs Bois Construction, 2007
- [FPI 11] FPIInnovations, *Manuel CLT*, 2011.
- [GAB 12] GABENISCH A., MAËS J., MANDRET N., *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020*, Editions Nicole Merle-Lamoot, Gilles Pannetier, 2012.
- [ICE 12] Iceb, L'énergie grise des matériaux et des ouvrages, 2012.
- [MAG 10] MAGNIER L., HAGHIGHAT F. « Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. », *Building and Environment*, vol 45, n°3, 2010, p. 739-746.
- [MER 13] MERHEB R., Fiabilité des outils de prévision du comportement des systèmes thermiques complexes. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux. 2013.
- [MIC 09] MICHAUD F., CASTERA P., FERNANDEZ C., NDIAYE A., « Meta-heuristic Methods Applied to the Design of Wood-Plastic Composites, with Some Attention to Environmental Aspects », *Journal of Composite Materials* vol. 43, n°5, 2009, p. 533-548.
- [NDI 09] NDIAYE A., CASTÉRA P., FERNANDEZ C., MICHAUD F. « Multi-objective preliminary ecodesign ». *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol 3, n°4, 2009, p. 237-245.
- [PER 11] DI PERNA C., STAZI F., CASALENA A. U., D'ORAZIO M. «Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads ». *Energy and Buildings*, vol 43, n°1, 2011, p. 200-206.
- [REY 06] REYES-SIERRA M., COELLO COELLO C., « Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art ». *International Journal of Computational Intelligence Research*, vol. 2, n°3, 2006, p. 287-308.
- [VAN 00] VAN VELDHUIZEN D., LAMONT G., «Multiobjective Evolutionary Algorithms: Analyzing the State-of-the-Art ». *Evolutionary Computation*, vol. 8, n° 2, 2000, p. 125-147.
- [WAN 03] WANG W., RIVARD H., ZMEUREANU R.G., «Optimizing Building Design With Respect To Life-Cycle Environmental Impacts ». *Eighth International IBPSA Conference*, 2003, p. 1355-1362
- [WAN 05] WANG W., ZMEUREANU R., RIVARD H., «Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization ». *Building and Environment*, vol 40, n°11, 2005, p. 1512-1525.
- [WAU 10] WAUGH A., WELLS M., LINDEGAR M., «Tall Timber Buildings : Application of Solid Timber Constructions in Multi-Storey Buildings ». *International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe – Timber Committee*, 2010.