
Optimisation multi-objectif de planchers intermédiaires bois tenant compte d'objectifs mécaniques et environnementaux

Stéphanie Armand Decker^{1,3}, Thomas Garnesson³, Philippe Galimard¹,
Amadou Ndiaye², Alain Sempey¹, Philippe Lagièrre^{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, plagiere@nobatek.com

RÉSUMÉ. Afin d'optimiser simultanément l'épaisseur des planchers intermédiaires bois, leur niveau de confort vibratoire et leur impact sur l'environnement, un processus d'optimisation multi-objectif par essaim particulaire a été mis en œuvre. Dans un premiers temps les objectifs à optimiser, le cas d'étude et la méthodologie employée sont décrits. La modélisation des fonctions-objectif est ensuite réalisée. Les résultats sont alors présentés et discutés.

....

ABSTRACT. A multi-objective particle swarm optimization process is implemented in order to simultaneously optimise thickness, vibration comfort level, and environmental impact of intermediate timber floors. First, the objective to optimise, the case study and the methodology are described. Secondly, the modelling of objective-functions is performed. Finally, results are presented and discussed.

....

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

KEY WORDS : multi-objective optimisation, PSO, floor vibration, timber floor, 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 et des sources d'énergie de substitution, notamment renouvelables. Pourtant, le bois, matériau renouvelable, à faible potentiel de réchauffement climatique et rapide à mettre en œuvre (filiale sèche et préfabrication) reste actuellement peu utilisé 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. Le travail présenté ici est une partie d'un travail de thèse qui vise l'optimisation multi-objectif de la composition de l'enveloppe et de la structure de bâtiments bois multi-étages. 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. L'objectif ici est 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.

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

2.1. Les objectifs à optimiser

Les quatre objectifs à optimiser - confort vibratoire, épaisseur de plancher, énergie grise et potentiel de réchauffement climatique - sont contradictoires. Selon la portée du plancher considérée, l'obtention d'un confort vibratoire satisfaisant mène à rigidifier la structure via l'augmentation de la dimension des éléments bois ou encore l'usage d'une chape béton ; alors que l'augmentation de la dimension des éléments bois impacte l'épaisseur finale du plancher la rendant parfois dissuasive au profit d'un autre système constructif. De même la dimension des éléments bois et l'usage d'une chape béton peuvent avoir un impact néfaste sur l'énergie grise et le potentiel de réchauffement climatique sur le cycle de vie du plancher. Ces contradictions traduisent le fait qu'il n'existe pas une solution optimale au regard de ces quatre 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 des compromis optimaux 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 quatre objectifs nécessite également la prise en compte de ces contraintes mécaniques. Des calculs de pré-dimensionnement des planchers 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 en flexion. 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

Pour obtenir les compromis optimaux, plusieurs variables de conception sont considérées dans cette étude (**Tableau 1**). Le type de plancher est ici une variable discrète de l'optimisation. Le plancher peut donc être un

plancher à solives (**Figure 1**) ou un plancher constitué de panneaux bois lamellés croisés (plancher CLT) (**Figure 2**). 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 les planchers CLT, l'épaisseur de plâtre au niveau du plafond, qui joue un rôle sur la sécurité incendie et enfin l'épaisseur d'une éventuelle chape.

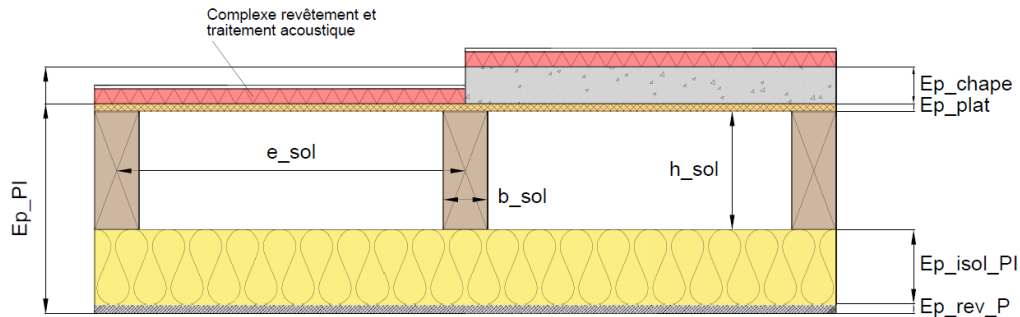


Figure 1. Planchers à solives

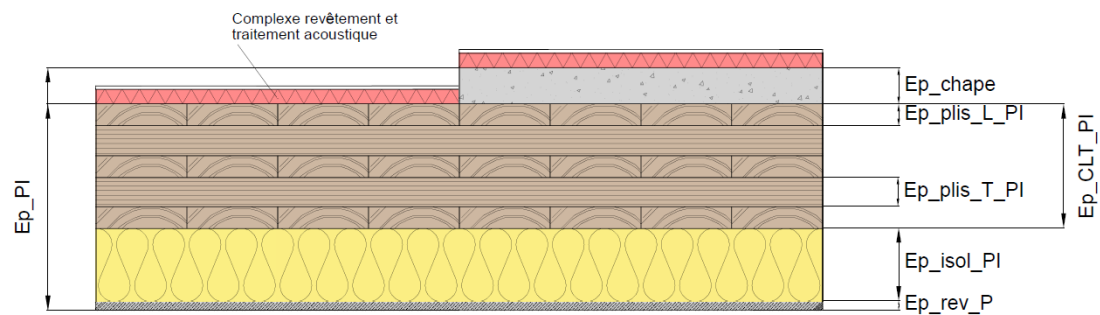


Figure 2. Plancher CLT (Cross Laminated Timber)

Tableau 1. Description des variables

| Variables | Description | Unité | Type de variable | Domaine de variation ou valeur |
|-------------|--|-------|------------------|--|
| Type_PI | Type de plancher intermédiaire | - | Discrète | Type_PI={CLT ;Solives} |
| 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_PI | Épaisseur des plis CLT extérieurs longitudinaux pour les panneaux 5 plis | m | Continue | $0,02 \leq h_{\text{plis_L_PI}b} \leq 0,08$ |
| nb_rt | Nombre de renfort | - | Discrète | nb_rt = {1;3;5;7} |
| h_sol | Hauteur des solives | m | Discrète | h_sol = {0,175;0,22;0,265;0,31;0,355;0,40} |
| b_sol | Épaisseur des solives | m | Discrète | b_sol = {0,07;0,09;0,1;0,11;0,12;0,14;0,16;0,21} |
| e_sol | Entraxe des solives | m | Discrète | e_sol ∈ [0,3;1] avec discrétisation de 0,05 |
| Ep_plat | Épaisseur du platelage | m | Constante | Ep_plat=0,022 |
| Ep_rev_P | Épaisseur de la plaque de plâtre du plafond | m | Discrète | Ep_rev_P = {0,0125;0,018;0,025} |
| Ep_chape | Épaisseur de la chape béton | m | Continue | $0,4 \leq Ep_{\text{chape}} \leq 0,1$ ou $Ep_{\text{chape}}=0$ |
| Ep_isol_PI | Épaisseur de l'isolant | m | Constante | Ep_isol_PI=0,08 |
| Ep_CLT_PI | Épaisseur du panneau CLT | m | Calculée | Fonction du nombre de plis et de leur épaisseur |

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. L'OEP a été privilégiée dans ce travail pour optimiser simultanément les quatre objectifs contradictoires.

La méthode d'optimisation particulière consiste à déplacer les particules 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 à 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].

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

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

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

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

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 jamais visité 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. L'Eurocode 5 [AFN 12] propose trois critères de vérification du confort vibratoire des planchers bois courants à respecter : 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}). 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 [5]). Un cinquième niveau (0) permettant de qualifier les planchers présentant une performance accrue vis-à-vis du confort vibratoire a été ajouté.

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). Les niveaux de confort considérés sont échelonnés similairement à ceux des planchers 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 du plancher* ($F_{vibration}$) [7] va permettre de minimiser le niveau de confort.

$$\begin{aligned}
 N_{vib} = 0 & : \text{Excellent pour } a \leq 0,5 \text{ mm/kN et } f \geq 8 \text{ Hz et } v_{lim} \leq v_{max} \\
 N_{vib} = 1 & : \text{Très bon pour } 0,5 < a < 1 \text{ mm/kN et } f \geq 8 \text{ Hz et } v_{lim} \leq v_{max} \\
 \text{Type_PI=Solives} \quad N_{vib} = 2 & : \text{Bon pour } 1 \leq a \leq 1,6 \text{ mm/kN et } f \geq 8 \text{ Hz et } v_{lim} \leq v_{max} \quad [5] \\
 N_{vib} = 3 & : \text{Moyen pour } 1,6 < a < 3 \text{ mm/kN et } f \geq 8 \text{ Hz et } v_{lim} \leq v_{max} \\
 N_{vib} = 4 & : \text{Inacceptable pour } a \geq 3 \text{ mm/kN ou } f \leq 8 \text{ Hz ou } v_{lim} \leq v_{max}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_{vib} = 0 & : \text{Excellent pour } a \leq 0,5 \text{ mm/kN et } \frac{f}{a^{0,7}} \geq 13 \\
 N_{vib} = 1 & : \text{Très bon pour } 0,5 < a < 1 \text{ mm/kN et } \frac{f}{a^{0,7}} \geq 13 \\
 \text{Type_PI=CLT} \quad N_{vib} = 2 & : \text{Bon pour } 1 \leq a \leq 1,6 \text{ mm/kN et } \frac{f}{a^{0,7}} \geq 13 \quad [6] \\
 N_{vib} = 3 & : \text{Moyen pour } 1,6 < a < 3 \text{ mm/kN et } \frac{f}{a^{0,7}} \geq 13 \\
 N_{vib} = 4 & : \text{Inacceptable pour } a \geq 3 \text{ mm/kN ou } \frac{f}{a^{0,7}} \geq 13
 \end{aligned}$$

$$F_{vibration} : \min(N_{vib}) \quad [7]$$

La fonction-objectif *épaisseur des planchers* ($F_{epaisseur}$) [8] va permettre de minimiser la somme de l'épaisseur des différentes couches du plancher.

$$F_{epaisseur} : \min(Ep_chape + Ep_rev_PI + Ep_isol_PI + h_sol + Ep_plat + Ep_CLT_PI) \quad [8]$$

3.2. Objectifs environnementaux

Les fonctions-objectif *énergie grise des planchers* ($F_{energie}$) et *potentiel de réchauffement climatique des planchers* (F_{prc}) [10] consistent respectivement à minimiser l'énergie grise (E_g) et le potentiel de réchauffement climatique (Prc) du plancher 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 du 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] (**Tableau 2**).

$$\begin{aligned}
 F_{energie} : \min & \left(\frac{(Eg_LDR*Ep_isol_PI + Eg_BA*Ep_rev_P + Eg_chape*Ep_chape + Eg_CLT*Ep_CLT + \right. \\
 & \left. Eg_OSB*Ep_plat)*L_bat*Portee_PI + Eg_BLC*h_sol*(b_sol*nb_sol*Portee_PI + 2*b_mur*L_bat) + \right. \\
 & \left. Eg_Bois*(nb_rt*h_sol*b_mur*(L_bat - nb_sol*b_sol)/2)}{L_bat*Portee_PI} \right) \\
 F_{prc} : \min & \left(\frac{(Prc_LDR*Ep_isol_PI + Prc_BA*Ep_rev_P + Prc_chape*Ep_chape + Prc_CLT*Ep_CLT + \right. \\
 & \left. Prc_OSB*Ep_plat)*L_bat*Portee_PI + Prc_BLC*h_sol*(b_sol*nb_sol*Portee_PI + 2*b_mur*L_bat) + \right. \\
 & \left. Prc_Bois*(nb_rt*h_sol*b_mur*(L_bat - nb_sol*b_sol)/2)}{L_bat*Portee_PI} \right) \quad [10] \\
 \text{avec : } nb_sol & = \text{Tronque}\left(\frac{L_bat}{e_sol} + 1\right)
 \end{aligned}$$

où $Portee_PI$ est la portée du plancher, b_mur l'épaisseur de la muraille dans le cas d'un plancher à solives et nb_sol le nombre de solives calculé selon la longueur du bâtiment L_bat et l'entraxe des solives e_sol .

Tableau 2. Données environnementales

| Description | E_g (kWh _{EP} /m ³) | Prc (kgCO _{2eq} /m ³) |
|---|--|--|
| Chape fluide béton | Eg_chape 3220 | Prc_chape 388 |
| Dalle pleine béton armé C25 XF1 autoplaçant | Eg_Beton 3185 | Prc_Beton 385 |
| Bois lamellé collé* | Eg_BLC 6205 | Prc_BLC 85 |
| | Eg_CLT | Prc_CLT |
| Bois de structure intérieur | Eg_bois 3073 | Prc_bois -361*** |
| Panneau lamelles de bois orientées OSB de type3 | Eg_OSB 8438 | Prc_OSB -472*** |
| Laine de roche | Eg_LDR 4320** (2160) | Prc_LDR 310** (155) |
| Plaque de plâtre BA13 | Eg_BA 7524** (3762) | Prc_BA 392** (196) |

* Données également utilisées pour le CLT car il n'y a pas de FDES correspondante

** Ces matériaux ont une durée de vie de 50 ans, leur impact a donc été multiplié par deux pour prendre en compte leur renouvellement sur le cycle de vie du bâtiment

***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

3.3. Cas d'étude et solutions de références

Le cas d'étude considéré est un plancher d'une portée de 5,9 m situé dans un logement collectif de plus de trois étages. La durée de résistance au feu doit être supérieure à 60 minutes. Dans cette étude, le complexe de revêtement et de traitement acoustique des planchers n'a pas été considéré. Pour pouvoir comparer les compromis optimaux calculés, trois configurations de référence de plancher ont également été étudiées : un plancher CLT, choisi selon les abaques de pré-dimensionnement mécaniques d'un fabricant de panneau CLT [KLH 08], un plancher solive, et un plancher béton choisis selon des abaques similaires sur les systèmes constructifs bois [KOL 10]. Les caractéristiques de ces configurations ont permis de calculer la valeur de référence de chacune des fonctions-objectif (**Tableau 3**). Elles permettront de situer les compromis optimaux obtenus par l'optimisation multi-objectif par rapport à ces références.

Tableau 3. Résultats pour les planchers de référence

| Description Planchers de référence | N_{vib} [-] | E_{paiss} [cm] | Prc [kgCO _{2eq} /m ²] | E_g [kWh _{EP} /m ²] |
|--|------------------|---------------------|---|---|
| Plancher CLT 5 plis (34/40/34/40/34) sans chape | 4 | 27,5 | 45 | 1568 |
| Plancher Solives (e_sol=0,6m, h_sol=0,32m, b_sol=0,12m) sans chape | 1 | 43,5 | 25 | 1109 |
| Plancher béton (Ep_chape=0,22m) | 0* | 31,3 | 114 | 1140 |

*Le niveau de confort vibratoire du plancher béton n'a pas été évalué. Il sera considéré comme excellent dans la suite de cette étude.

Les planchers bois de référence respectent l'ensemble des contraintes ELU. Néanmoins le plancher CLT, avec un niveau de vibration de 4, ne satisfait pas le critère de confort vibratoire. Il est en effet spécifié sur les abaques du fabricant CLT que les planchers de grande portée nécessitent un dimensionnement aux vibrations plus précis. Cela peut expliquer son épaisseur intéressante par rapport aux deux autres systèmes.

4. Résultats et discussion

Suite au processus d'optimisation, 35 compromis optimaux ont été obtenus dont 2 solutions CLT et 33 solutions à solives. Le front de Pareto, qui représente l'ensemble des solutions optimales, et les solutions de références (Ref) ont été représentés dans la **Figure 3** selon les quatre fonctions-objectif pris deux à deux. Quelques exemples de solutions sont également détaillés dans le **Tableau 4**.

Malgré une épaisseur parfois importante (> 40cm) les planchers à solives présentent un faible potentiel de réchauffement climatique (<30 kgCO_{2eq}/m²), ce qui correspond à près d'un quart du potentiel de réchauffement climatique du plancher béton. Concernant l'énergie grise le plancher béton de référence reste performant. En effet le procédé de fabrication d'un mètre cube de bois lamellé collé nécessite une énergie grise (6205 kWh_{EP}/m³) deux fois supérieure à l'élaboration d'un mètre cube de plancher béton (3185 kWh_{EP}/m³). Cela explique que les planchers CLT soient les solutions les plus défavorables concernant l'énergie grise requise sur leur cycle de vie. Les solutions CLT sont donc plus compétitives que les solutions à solives au niveau de l'épaisseur mais nécessitent une quantité de bois importante et sont donc moins avantageuses pour ce qui est de leur impact environnemental.

La solution à solives de référence, d'épaisseur 43,5 cm, est dominée au niveau de ses performances sur l'ensemble des objectifs par plusieurs solutions dont celle à solives d'épaisseur 38 cm (**Tableau 4**).

Les solutions obtenues ne sont pas toujours intuitives. Par exemple, dans un plancher à solives la hauteur des solives est habituellement près de deux fois supérieure à leur épaisseur [KOL 10], ce qui se justifie par une bonne tenue mécanique en flexion pour un usage de bois modéré. Les planchers à solives de faible épaisseur obtenus par optimisation possèdent des sections de poutre presque carré, ce qui leur permet d'atteindre des niveaux de confort vibratoire acceptable tout en restant compétitifs face à d'autres systèmes constructifs de faible épaisseur.

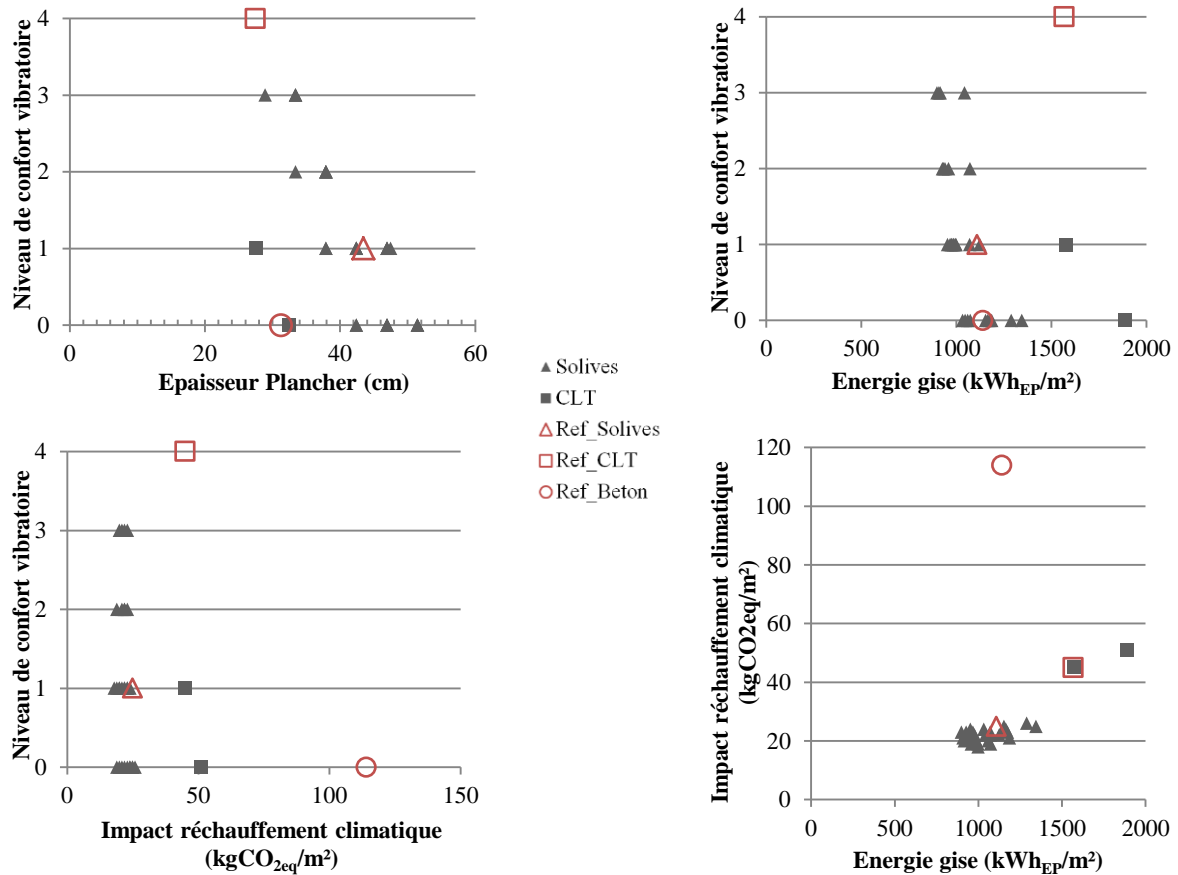


Figure 3. Représentation du front de Pareto selon le niveau de confort vibratoire par rapport aux trois autres fonctions-objectif.

Tableau 4. Exemples de solutions sur le front de Pareto

| Planchers Solives | | | | | | | |
|-------------------|-------------|--------------|-------------|-----------|-----------------|--|--------------------------------------|
| nb_rt | h_sol | b_sol | e_sol | N_{vib} | $E_{paissieur}$ | Prc | Eg |
| | | | | [-] | [cm] | [kgCO _{2eq} /m ²] | [kwh _{EP} /m ²] |
| 1 | 0,265 | 0,21 | 0,95 | 1 | 38,0 | 24 | 1063 |
| 7 | 0,355 | 0,11 | 0,95 | 1 | 47,0 | 18 | 999 |
| 0 | 0,22 | 0,14 | 0,85 | 3 | 33,5 | 23 | 899 |
| 1 | 0,175 | 0,16 | 0,5 | 3 | 29,0 | 24 | 1030 |
| 3 | 0,31 | 0,12 | 0,4 | 0 | 42,5 | 26 | 1290 |
| Planchers CLT | | | | | | | |
| nb_plis_PI | h_plis_T_PI | h_plis_L_PIb | h_plis_L_PI | N_{vib} | $E_{paissieur}$ | Prc | Eg |
| | | | | [-] | [cm] | [kgCO _{2eq} /m ²] | [kwh _{EP} /m ²] |
| 7 | 0,021 | - | 0,041 | 0 | 32,5 | 51 | 1889 |
| 3 | 0,023 | - | 0,08 | 1 | 27,6 | 45 | 1575 |

La solution CLT de référence est dominée au regard des performances par une solution de même épaisseur, avec un très bon niveau de confort vibratoire (1). Seul l'agencement des plis change avec des plis

longitudinaux plus épais (en réalité deux plis longitudinaux seront superposés), l'impact environnemental reste donc sensiblement le même.

Parmi les solutions obtenues aucune ne possède de chape béton, il apparaît donc que dans cette configuration de plancher, la rigidité d'une chape flottante ne permet pas d'améliorer le confort vibratoire des planchers de façon optimale. Une chape peut néanmoins être nécessaire dans un bâtiment bois où l'inertie thermique ne serait pas suffisante pour maintenir un confort thermique estival acceptable. Un cinquième objectif traitant l'inconfort thermique serait donc à envisager pour l'optimisation des planchers intermédiaires à l'échelle du bâtiment.

5. Conclusions et perspectives

Un processus d'optimisation multi-objectif par essai particulière a été réalisé sur un plancher intermédiaire bois à usage résidentiel, où le confort vibratoire, l'épaisseur et l'impact environnemental ont été choisis comme fonctions-objectif. Les résultats obtenus offrent une certaine diversité dans un panel de 35 solutions optimales, qui dominent les solutions de références, parfois même sur l'ensemble des objectifs concernés.

Le plancher intermédiaire a ici 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 ne font donc pas 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 ici, de minimiser les besoins de chauffage et l'inconfort thermique estival d'un bâtiment multi-étage s'avèrent nécessaires et sont en cours de réalisation.

6. 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 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.
- [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.
- [KLH 08] KLH, Diagrammes de pré-dimensionnement, 2008.
- [KOL 10] KOLB J., *Bois systèmes constructifs*, Editions PPUR, 2010.
- [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., CASTERA 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.
- [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