



# **Analyse multidisciplinaire des assemblages plafond à plancher dans les bâtiments en bois et développement d'une stratégie d'optimisation multi-objectif**

**Mémoire**

**Sabrine Bougrine**

**Maîtrise en génie mécanique - avec mémoire**  
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

# **Analyse multidisciplinaire des assemblages plafond à plancher dans les bâtiments en bois et développement d'une stratégie d'optimisation multi-objectif**

**Mémoire**

**Sabrine Bougrine**

Sous la direction de :

Louis Gosselin, directeur de recherche

# Résumé

La conception de l'assemblage plafond-plancher dans un bâtiment en bois peut être un défi en raison de ses aspects multidisciplinaires et des limitations d'espace. En tant qu'un composant du bâtiment, cet espace possède un rôle structural et représente un volume dans lequel passent les systèmes de la mécanique du bâtiment. L'objectif de ce travail est de démystifier l'assemblage plafond-plancher à travers une recherche bibliographique et des entrevues semi-dirigées et de développer ensuite une méthodologie d'optimisation multi-objectif pour une conception optimale de ce sandwich. Le modèle développé intègre tant la partie structurale que les systèmes de la mécanique du bâtiment, dont un but de minimiser l'épaisseur de l'assemblage tout en optimisant le système de ventilation qui passe dedans. L'algorithme NSGA-II est utilisé dans le processus d'optimisation. Une étude de cas sur un assemblage plafond-plancher dans un bâtiment en bois a été réalisée pour évaluer le modèle développé, où trois configurations d'assemblage ont été testées. Dans la première configuration, le réseau de ventilation passe à travers la structure, soit en parallèle aux poutres, soit en les traversant. Dans ce cas, des ouvertures seront nécessaires à condition que le diamètre de la conduite ne dépasse pas 15% de la hauteur des poutres. Dans la deuxième configuration, on considère que les poutres sont renforcées, pour donner une tolérance supplémentaire relative à l'ouverture au niveau des poutres allant jusqu'à 30% de leur hauteur. La troisième configuration est la méthode traditionnelle où aucune ouverture n'est autorisée et le réseau de ventilation passe en dessous de la structure. Pour les trois configurations, deux types de dispositions des gaines de ventilation ont été évaluées. Les meilleures solutions sont présentées sous la forme de fronts de Pareto. L'analyse des résultats montre que l'optimisation de la configuration traditionnelle de l'assemblage donne toujours de meilleures solutions (où l'épaisseur de l'assemblage varie de 0.65 m à 0,87m et la perte de pression varie de 50 Pa à 105 Pa) comparativement aux deux autres configurations.

# Abstract

The design of the ceiling-to-floor assembly in timber buildings can be challenging due to its multidisciplinary aspects, space limitations, and requirements of timber constructions. As a component of the building, this space has a structural role. It ensures the safety and comfort of occupants and represents a volume through which building services systems pass. The objective of this work is to demystify the ceiling-to-floor assembly in timber buildings and to develop a multi-objective optimization method for an optimum design. In order to do this, bibliographical research was carried out in various databases. This step was accompanied by a series of semi-structured interviews with wood construction experts. Then a multi-objective optimization strategy for the ceiling-to-floor assembly was developed. It integrates both structures and building mechanical systems to minimize the thickness of the ceiling-to-floor assembly and optimize the pressure drops in the air distribution system that passes through it. The multi-objective genetic algorithm (NSGA-II) is used in the optimization process. Design variables related to the structure and ventilation network are taken into account. A case study of a ceiling-to-floor assembly in a timber building was carried out to evaluate the developed model, where three assembly configurations were tested: (i) the diameter of an aperture in a beam to let a duct pass is limited to 15% of the beam height, (ii) the aperture diameter limitation is 30% of the beam height, corresponding to a beam with reinforcement, (iii) no apertures are allowed and the ducts are below the beams. Best solutions are presented through the Pareto fronts and the optimal dimensions of the structure and air distribution ducts are generated. For the case study, results show that the optimization algorithm gives better results in terms of thickness and pressure drops in the third configuration where ducts pass through beams (assembly thickness ranges from 0.65 to 0.87 m, pressure drops from 50 Pa to 105 Pa), compared to the configuration where the duct passes through the structure.

# Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Table des matières .....	iv
Liste de tableaux.....	vii
Liste des figures.....	vi
Nomenclatures .....	viii
Remerciements.....	x
Avant-propos.....	xi
Introduction .....	1
CHAPITRE 1. REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1 Le bois dans les constructions.....	5
1.1.1 Avantages de l'utilisation du bois dans les bâtiments .....	5
1.1.2 Les défis de l'utilisation du bois dans les bâtiments .....	6
1.2 Les systèmes constructifs utilisés dans les constructions en bois.....	6
1.2.1 Les systèmes en ossature légère .....	7
1.2.2 Les systèmes en bois massif .....	8
1.2.1 Les systèmes hybride .....	10
1.3 Les configurations des espaces plafond à plancher .....	11
1.4 Les espaces plafond à plancher dans la littérature.....	14
1.4.1 Modélisation et optimisation des systèmes mécaniques au niveau de l'espace plafond à plancher ..	15
1.4.2 Coordination et modélisation numérique des éléments du bâtiment .....	16
CHAPITRE 2. CEILING-TO-FLOOR SANDWICH IN TIMBER BUILDINGS: COMPARING LITERATURE AND WHAT EXPERTS SAY ON DESIGN AND PERFORMANCE OF THIS MULTIFACETED SPACE .....	20
Résumé .....	21
Abstract .....	22
2.1 Introduction.....	22
2.2 Research methodology.....	22
2.3 Litterature review .....	23
2.3.1 Vibration performance.....	26
2.3.2 Acoustical aspect.....	27
2.3.3 Environmental aspect .....	29
2.3.4 MEP installations through ceiling-to-floor assemblies.....	30
2.4 Semi-structured interviews.....	31
2.4.1 Definitions of ceiling-to-floor space .....	31
2.4.2 Ceiling to floor structural choice.....	32
2.4.3 Factors influencing ceiling-to-floor thickness .....	32
2.4.4 Position of MEP subsystems through timber ceiling-to-floor assemblies .....	33
2.4.5 Challenges and opportunities in terms of ceiling-to-floor space optimization .....	33
2.5 Discussion .....	33
2.6 Conclusions .....	34
CHAPITRE 3. MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF CEILING-TO-FLOOR SYSTEMS IN TIMBER BUILDINGS TAKING INTO ACCOUNT STRUCTURAL AND HVAC RELATED OBJECTIVES.....	35
Résumé .....	36
Abstract.....	36
3.1 Introduction.....	37
3.1.1 Context .....	37
3.1.2 MEP design optimization .....	38
3.1.3 CTFS structural considerations.....	39

3.1.4	Integration of MEP and structure in CTFS .....	39
3.1.5	Contribution of the present work .....	40
3.2	Material & methods .....	41
3.2.1	Structural modeling .....	43
3.2.2	Modeling of air distribution system .....	49
3.2.3	Optimization problem .....	50
3.3	Case study description .....	55
3.4	Results and discussion .....	57
3.4.1	Algorithm convergence .....	57
3.4.2	Solutions analysis .....	59
3.5	Conclusions .....	66
	Conclusion .....	68
	Bibliographie .....	71
	Annexe A : Questionnaires des entrevues semi-dirigées .....	79
	Annexe B : Article pour APCHQ .....	85
	Annexe C : Exemples de solutions proposées .....	89

# Liste des tableaux

Table 3.1. List of design variables and their bounds. ....	52
Table 3.2. Properties of the CLT panels: strength and modulus of elasticity of CLT grads .....	53

# Liste des figures

Figure 1.1. Système en ossature légère d'une charpente en bois .....	7
Figure 1.2. Poutrelle ajourée entre deux étages d'un bâtiment .....	8
Figure 1.3. Disposition des gaines à travers une structure en ossature en bois .....	8
Figure 1.4 a Construction en bois massif .....	9
Figure 1.4 b Batiment en bois massif (CLT).....	9
Figure 1.5. Construction hybride, système plafond à plancher bois-béton .....	10
Figure 1.6 a. Poutrelles en bois-métaux .....	10
Figure 1.6 b Poutrelles ajourées hybrides.....	10
Figure 1.7. Espace interstitiel complet.....	11
Figure 1.8. Espace interstitiel partiel, Université de Washington .....	12
Figure 1.9. Espace interstitiel : type passerelle.....	12
Figure 1.10. Système mécanique suspendu sous un plafond .....	13
Figure 1.11. Système mécanique suspendu sous un plancher .....	13
Figure 1.12 Système mécanique cachée par un plafond suspendu .....	13
Figure 1.13. Système mécanique caché par un plancher surélevé .....	14
Figure 1.14. Systèmes mécaniques intégrés au niveau de l'assemblage plafond à plancher .....	14
Figure 1.15. Identification des systèmes MEP, structure pour un point de départ dans un projet .....	16
Figure 1.16. Modélisation des éléments du bâtiment.....	17
Figure 1.17. Modélisation des éléments du bâtiments : MEP et structure .....	17
Figure 1.18. Coordination des systèmes MEP pour élimination des collisions .....	18
Figure 1.19. Coordination des systèmes MEP face à des contraintes d'espace .....	18
Figure 2.1. Schematic representation of ceiling-to-floor structural systems in timber buildings .....	24
Figure 2.2. Different ceiling-to-floor aspects in timber buildings covered in literature .....	25
Figure 2.3. Main definitions of the ceiling-to-floor assembly according to semi-structured interviews .....	32
Figure 3.1. Workflow diagram summarizing the main steps followed in the present paper .....	41
Figure 3.2. Schematic representation of the ceiling-to-floor assembly optimized in this work. ....	42
Figure 3.3. Workflow diagram illustrating the design optimization approach (left-hand side) and procedure for calculating constraints and objectives functions (right-hand side). ....	43
Figure 3.4. Schematic top-view representation of the structural (yellow) and air distribution systems (red) for the case study.....	56
Figure 3.5. Evolution of the Pareto front over generations for the test case with unreinforced beams.....	57
Figure 3.6. Logarithmic presentation of GD, IGD, and SP variation as function of generation.....	58
Figure 3.7. Comparison of Pareto fronts for three possible configurations: unreinforced beams (green), reinforced beam (orange), and ducts positioned below beams (purple) .....	59
Figure 3.8. Parallel coordinate plot of the optimal design variables related to the structure with unreinforced beams.....	62
Figure 3.9. Parallel coordinate plot of the optimized design variables related to the ducts with unreinforced beams.....	62
Figure 3.10. Parallel coordinate plot of the optimal design variables related to the structure for the configuration with reinforced beams.....	63
Figure 3.11. Parallel coordinate plot of the optimized design variables related to the ducts for the configuration with reinforced beams.....	64

Figure 3.12. Parallel coordinate plot of the optimal design variables related to the structure for the configuration with ducts below beams.....	65
Figure 3.13. Schematic top-view representation of the structural (yellow) and air distribution (red) systems of the second layout tested in this work.....	66
Figure 3.14. Pareto front for two different duct layouts (from Fig. 3.4 in orange and from Fig. 3.13 in blue) with unreinforced beams.....	66
Figure B.1. Exemple de représentation schématique en vue de dessus du système structural (gris) et de la distribution d'air (bleu).....	87
Figure B.2. a) Front de Pareto des solutions optimales, b) Diagramme de points montrant la configuration de 9 solutions choisies.....	88



# Nomenclatures

$A_n$	Section de la poutre, $m^2$
$A_g$	Section du panneau CLT, $m^2$
$b$	Largeur du panneau CLT, m
$C_v$	Coefficient de charge de cisaillement, -
$C_B$	Rapport d'élançement, -
$D$	Charge mort, kPa
$D_i$	Diamètre de la section $i$ , m
$D_{max}$	Valeur maximale du diamètre de la conduite, m
$D_{min}$	Valeur minimale du diamètre de la conduite, m
$D_h$	Diamètre hydraulique, m
$E$	Module de Young, MPa
$E_{I_{eff}}$	Résistance effective, $Nmm^2$
$f$	Facteur de friction, -
$F_b$	Facteur de force en flexion, MPa
$F_v$	Facteur de force en cisaillement, MPa
$h$	Epaisseur du panneau CLT, m
$H_p$	Hauteur de la poutre, m
$I$	Moment d'inertie, $m^4$
$K_D$	Coefficient durée de charge, -
$K_S$	Coefficient de service, -
$K_H$	Coefficient de system, -
$K_T$	Coefficient de traitement, -
$L$	Charge vive, KPa
$L_b$	Longueur de la poutre, m
$L_e$	Longueur effective de la poutre, m
$L_{eq,i}$	longueur équivalent, m
$L_i$	Longueur de la section de conduite, m
$L_p$	Longueur du panneau en CLT, m
$L_t$	Largeur du panneau en CLT, m
$N_p$	Nombre de panneaux en CLT, -
$n$	Nombre des solutions sur le front de Pareto, -
$n_t$	Nombre des solutions sur le vrai front de Pareto, -

$M_{rp}$	Moment résistant à plat du panneau CLT, KNm
$M_{rb}$	Moment résistant de la poutre en BLC, KNm
$M_{fp}$	Moment de flexion du panneau en CLT, KNm
$M_{fb}$	Moment de flexion de la poutre en BLC, KNm
$P$	Pression, Pa
$Q_i$	Débit dans la section $i$ , $m^3/s$
$S$	Moment statique, $m^3$
$S_{eff}$	Module effectif du panneau CLT, $m^3$
$V$	Vitesse de fluide au sein d'un conduit, m/s
$V_{rp}$	Résistance en cisaillement du panneau en CLT, N
$V_{rb}$	Résistance en cisaillement de la poutre en BLC, N
$V_{fp}$	Charge en cisaillement du panneau en CLT, N
$V_{fb}$	Charge en cisaillement de la poutre, N
$V_{max}$	Valeur maximale de vitesse, m/s
$V_{min}$	Valeur minimale de vitesse, m/s
$w$	Charge distribuée, $KN/m^2$
$W_f$	Charge totale, KN
$W_r$	Résistance au cisaillement, KN
$Z$	Volume de la poutre, $m^3$
$\Delta P_{max}$	Perte de pression maximale, Pa
$\rho$	Densité, $kg/m^3$
$\phi$	Facteur de résistance, -

## Abréviations

BLC	Bois lamellé collé
CSA	Canadian standards association
CLT	Cross laminated timber
HVAC	Heating, ventilation and air conditioning
NSGA_II	Non-dominated sorting genetic algorithm

# Remerciements

Mes sincères remerciements s'adressent en premier à mon encadrant le professeur Louis Gosselin. Merci de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce projet. Merci pour votre encadrement, encouragement ainsi que pour la pertinence de vos commentaires qui ont pu faire progresser cette maîtrise.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe de la chaire de recherche sur la construction écoresponsable en bois (CIRCERB), ainsi que leurs partenaires industriels, particulièrement les professionnels interviewés pour leurs disponibilités, leur important support et leurs bienveillances pour échanger autour du sujet de ce mémoire.

De plus, je souhaite souligner les soutiens financiers que m'ont été généreusement accordés par Mitacs Globalink et par la chaire de recherche à laquelle j'appartiens (CIRCERB).

# Avant-propos

Ce mémoire est rédigé en suivant la méthode "mémoire par insertion d'articles". Il est composé de 5 chapitres dont deux représentent les deux articles rédigés au cours de cette maîtrise. Un bref résumé sur ces articles est présenté ci-dessous.

Le premier article, intégré au chapitre 3, est intitulé "CEILING-TO-FLOOR SANDWICH IN TIMBER BUILDINGS: COMPARING LITERATURE AND WHAT EXPERTS SAY ON DESIGN AND PERFORMANCE OF THIS MULTIFACETED SPACE". Il a été publié à la conférence : World Conference on Timber Engineering, Santiago, Chili 9-12, August 2021.

Notes : Article rédigé par S. Bougrine et révisé par L. Gosselin. J'ai effectué la revue de la littérature ainsi que les entrevues semi-dirigées avec les experts de la construction en bois. J'ai rédigé la première version de l'article et j'ai apporté les corrections après les révisions. La version présentée ici a été légèrement modifiée par rapport à la version publiée pour répondre aux règles de présentation de ce mémoire.

Le deuxième article, intégré au chapitre 4 est intitulé "MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF CEILING TO FLOOR SYSTEMS IN TIMBER BUILDING TAKING INTO ACCOUNT STRUCTURAL AND MECHANICAL OBJECTIVES". Il a été soumis au " Journal of Building Engineering" en date de 2022-11-18. La version présentée dans ce mémoire est la version révisée après les commentaires des évaluateurs du Journal.

Notes : Article rédigé par S. Bougrine et L. Gosselin. La version principale a été rédigée par S. Bougrine, révisée et améliorée par L. Gosselin. J'ai effectué la revue de la littérature et j'ai participé à l'élaboration du modèle mathématique. J'ai créé les scripts du modèle sur Matlab, ainsi que j'ai couplé le code avec l'algorithme d'optimisation (NSGA-II). J'ai participé à la réalisation et l'interprétation des figures ainsi qu'à l'analyse des résultats. Seulement la mise en page de l'article a été modifiée par rapport à la version soumise au journal.

# Introduction

## Mise en contexte

Les bâtiments contribuent à environ 30% des émissions des gaz à effet de serre à travers le monde, et consomment environ 40 % de l'énergie mondiale à travers la demande en chauffage, climatisation, électricité et charge aux prises [1]. Au Canada, les bâtiments représentent aussi une source importante de consommation de ressources naturelles. C'est pourquoi l'efficacité énergétique des bâtiments et le développement des approches plus durables attirent de plus en plus l'attention. Une conception plus efficace, durable et écoresponsable permet non seulement une économie d'énergie, mais aussi un gain en espace et en performance du système constructif des bâtiments. Afin de répondre à ce défi, on peut recourir au bois, un matériau renouvelable permettant de minimiser les émissions de gaz à effet de serre et qu'on apprécie pour la rapidité et l'efficacité qu'il permet lors de l'érection des bâtiments [2].

Durant les dernières années, une forte attention a été accordée aux constructions en bois multi étages. En fait, plusieurs études ont été menées afin d'encourager et de favoriser le développement de méthodes et outils encourageant l'utilisation du bois dans les systèmes constructifs des bâtiments qui historiquement ont plutôt utilisé d'autres matériaux [3,4]. En fait, environ 90% des nouvelles maisons unifamiliales sont construites avec du bois. Ce dernier peut être présent soit au niveau du plancher, mur ou encore au niveau du toit, ainsi son pourcentage dans la maison varie d'un bâtiment à un autre [5,6].

En comparant le bois à d'autres matériaux comme l'acier, l'aluminium et le béton, le bois possède une faible quantité d'énergie intrinsèque, il lui faut donc moins d'énergie pour le transformer en des produits utilisables dans la construction [7]. En plus, grâce à sa faible conductivité thermique, l'utilisation du bois dans les constructions contribue à améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment en diminuant les ponts thermiques au niveau de la structure [8]. D'un autre côté, plusieurs recherches se sont concentrées sur l'étude et l'optimisation des éléments du système constructif des bâtiments en bois. Par exemple, dans les références [9] et [10], les auteurs détaillent les règles de la conception des diaphragmes en bois en soulignant le manque de directives sur la conception sismique et en offrant à travers une analyse par éléments finis des recommandations sur l'estimation des forces appliquées sur ces éléments dans les bâtiments multi-étages en bois. Dans [11], les auteurs étudient plusieurs aspects de deux types de plancher intermédiaires dans un bâtiment en bois, en mettant l'accent sur l'avantage environnemental des planchers en bois par rapport à ceux en béton. Dans d'autres études, la rigidité de la structure des bâtiments en bois a été étudiée [12]. Les différents types de connexion au niveau de la structure ont été aussi investigués [11,12]. Tout cet intérêt pour la construction en bois montre l'importance grandissant de ce matériau.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés particulièrement à deux défis de la construction. Le premier défi concerne les restrictions de la hauteur (par exemple, imposées par les règles d'urbanisme), qui en contraignant la conception viennent limiter le nombre d'étages et la viabilité d'une construction. Le second défi concerne la nécessité de réduire la quantité de matériaux requis, tant pour des raisons environnementales qu'économiques. Relever ces défis milite en faveur d'une volumétrie compacte et de systèmes occupant le plus petit volume possible. Comme les éléments structuraux en bois peuvent être volumineux, ces défis peuvent être exacerbés dans la construction en bois. Face à ces défis, plusieurs solutions ont été proposées afin d'avoir une structure plus compacte, soit en utilisant des structures hybrides en bois et béton par exemple, soit en combinant différents types de bois dans un même système structural ou encore en améliorant le type de la connexion au niveau du système constructif [15]. D'autres idées encouragent l'utilisation de la préfabrication pour améliorer la coordination entre les différents éléments du système constructif et ainsi optimiser les assemblages [16].

Dans ce projet, on cherche à optimiser un volume qui se répète au niveau de chaque étage, soit l'espace entre un plafond et un plancher. Cet espace abrite des éléments structuraux et permet le passage de différents services électromécaniques, généralement sans que les occupants s'en aperçoivent. Ils représentent en outre une partie importante du volume total d'un bâtiment, soit de 17 à 25% du volume total du bâtiment (valeurs calculées à partir d'un bâtiment étudié dans [17] et dans [18]).

Réduire le volume permet donc de récupérer « quelques pouces de la hauteur » à chaque étage, ce qui d'une part peut aider à faire face aux limitations de la hauteur de construction et d'autre part, permet de réduire d'autant la quantité de matériaux requis pour l'enveloppe. Une piste prometteuse que nous avons explorée pour cela est de mieux intégrer les éléments structuraux (poutre, etc.) aux éléments de la mécanique du bâtiment (gainés de ventilation, etc.).

Plusieurs personnes sont impliquées dans le processus de conception de cet espace. Les architectes définissent ses limites géométriques. Les ingénieurs et ingénieures en structures assurent un dimensionnement structural conforme aux codes du bâtiment. Ensuite les demandes en énergie et en ventilation du bâtiment sont calculées par les ingénieurs et ingénieures en mécanique qui sont confrontés à la limitation de l'espace pour choisir les systèmes mécaniques les plus appropriés. Ces ingénieurs et ingénieures définissent les positions des éléments de la mécanique du bâtiment comme les voies de passages des gainés de distributions d'air qui influencent directement les performances énergétiques du bâtiment. Une mauvaise coordination entre les différents collaborateurs peut engendrer plusieurs conflits entre le système constructif et la mécanique du bâtiment, ce qui affecte forcément la performance de tout le bâtiment [19]. La conception de cet espace est donc multidisciplinaire. Elle doit respecter des codes, des normes et de bonnes pratiques pour garantir notamment la sécurité et le bien-être des occupants ainsi qu'une meilleure performance énergétique.

Malgré l'ensemble de règlements à respecter, il existe une diversité de design possibles permettant de répondre à différents contextes climatiques, urbains, fonctionnels, etc., ainsi qu'à différents niveaux de performance souhaités par le client en termes de coûts, de confort, d'énergie consommée, etc. Il y a donc une opportunité de proposer des innovations, et ce, malgré le cadre normatif exigeant.

Le mémoire présenté ici permet de mieux faire connaître les particularités des systèmes plafond à plancher dans les bâtiments en bois. On cherche à étudier les performances et les différents composants qui constituent cet espace. Il présente aussi une méthode de conception et d'optimisation d'un assemblage plafond à plancher dans un bâtiment en bois. L'objectif est de concevoir un modèle qui intègre tant la structure que les systèmes de la mécanique du bâtiment passant entre un plafond et un plancher. Le but est de minimiser l'épaisseur de l'assemblage et de minimiser la perte de pression au niveau du système de ventilation, et ce, à l'aide d'un algorithme génétique multi-objectif tout en assurant la mise en équation des règles du dimensionnement et les conditions de sévices des éléments de l'assemblage.

### **Objectif général**

L'objectif principal de ce mémoire est de démystifier, modéliser et optimiser les systèmes d'un assemblage plafond à plancher dans un bâtiment en bois.

### **Les objectifs spécifiques ciblés**

- 1) Explorer l'état de l'art sur les systèmes de l'assemblage plafond à plancher dans les bâtiments et les défis de leurs modélisations à travers une étude bibliographique et des entrevues semi-dirigées.
- 2) Modéliser et optimiser un assemblage plafond à plancher dans un bâtiment en bois à partir d'un algorithme d'optimisation multi-objectif. Le modèle inclut à la fois la partie structurale du système constructif de l'espace plafond à plancher et un système de la mécanique du bâtiment (système de distribution d'air : gaines de ventilation). L'objectif de l'optimisation est de minimiser l'épaisseur de l'assemblage plafond à plancher et de minimiser la perte de pression au niveau du système de distribution d'air.

### **Méthodologie**

Afin de bien répondre aux objectifs précédents, on a commencé par une revue de littérature pour explorer ce qui a été présenté et développé au niveau de la recherche scientifique sur les espaces plafond à plancher dans les bâtiments en bois. Les travaux sélectionnés ont permis de démystifier les configurations et les exigences des espaces plafond à plancher dans les bâtiments et de classer les études selon les aspects étudiés de cet espace. Cette étape a éclairé les limites de la recherche scientifique à ce niveau et a permis de bien définir les types, les composants et les exigences d'un assemblage plafond à plancher. Par la suite, une série des entrevues semi-dirigées avec six professionnels de la construction a permis de collecter de l'information pratique

à propos de la construction de l'assemblage plafond à plancher et de comparer ensuite les issus de la littérature avec les informations mentionnées par les participants. Ces derniers ont été choisis selon leur domaine d'expertise dont deux architectes, trois ingénieurs en génie civil et un ingénieur en génie mécanique. Chaque rencontre a duré environ 35 minutes. Une liste des questions avait été préparée à l'avance (Ces questions sont présentées à l'annexe A). Les rencontres ont été enregistrées afin que les informations récupérées puissent être bien analysées. Cela a permis de mieux comprendre l'état réel de la conception d'un assemblage plafond à plancher dans les bâtiments en bois, les bonnes pratiques pour un dimensionnement optimal ainsi que de récupérer des idées et des pistes d'amélioration de cet espace. Ce travail est présenté au chapitre 2.

Cette première étape a permis de cibler et de bien cadrer les objectifs de ce projet et d'élaborer par la suite un modèle mathématique permettant de dimensionner les éléments d'un assemblage plafond à plancher dans un bâtiment en bois. Le modèle comporte une partie présentant la structure en bois et une autre modélisant un système de mécanique du bâtiment qui passe dedans. Deux objectifs sont considérés pour l'optimisation de l'assemblage. Les différentes équations utilisées ainsi que les contraintes considérées sont présentées. Le modèle est implémenté sous le logiciel Matlab. Il est par la suite couplé avec un algorithme d'optimisation multi-objectif qui vise à générer les meilleures combinaisons entre les différentes variables de conception. Afin d'évaluer le modèle développé, un cas d'étude a été effectué permettant d'optimiser l'assemblage étudié. Des indicateurs ont été choisis pour évaluer les performances de l'algorithme génétique et atteindre par la suite les meilleurs résultats. Les solutions non dominées sont présentées à travers des fronts de Pareto. Une analyse des résultats obtenus et des recommandations liées au cas d'étude sont présentées. Ce travail est présenté au chapitre 3. Enfin la conclusion et des perspectives possibles pour des futures travaux sont présentées.



# CHAPITRE 1. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre introduit les avantages et les défis du bois en tant qu'un matériau utilisé dans la construction des bâtiments, les systèmes constructifs utilisés dans les bâtiments en bois ainsi que les espaces entre le plafond et le plancher, leurs arrangements et la façon dont ils sont organisés pratiquement. Il détaille en deuxième lieu les outils utilisés pour modéliser et coordonner les éléments des bâtiments.

## 1.1 Le bois dans les constructions

### 1.1.1 Avantages de l'utilisation du bois dans les bâtiments

L'idée d'utiliser le bois comme un matériau de construction existe depuis des milliers d'années, mais l'évolution de l'exploitation de ce matériau a subi un délaissement durant quelques années pour subir une véritable renaissance présentement [20]. La preuve de durabilité de ce matériau à travers les bâtiments d'hier est l'un des facteurs encourageants d'investir et d'améliorer l'utilisation du bois dans les bâtiments d'aujourd'hui [21].

Au Québec, entre 2016 et 2020, le pourcentage des bâtiments non résidentiels dont la structure de base est en bois a passé de 28% à 34%, ce qui traduit la volonté de profiter des avantages du bois [22]. Le bois est utilisé dans les différentes parties du bâtiment, notamment pour construire la structure, comme les colonnes, les poutres et la dalle. On le trouve aussi comme composant de l'enveloppe du bâtiment à travers le toit et les montants des murs, sans oublier qu'il fait partie des partitions du bâtiment comme les murs et les planchers [23]. Autre que la polyvalence du bois, son utilisation est une solution pour s'attaquer au réchauffement climatique dans un secteur (construction) qui participe énormément à l'émission du gaz à effet de serre. En comparant le bois avec d'autres matériaux utilisés dans la construction des bâtiments tels que le béton et l'acier, on constate qu'il génère moins de gaz à effet de serre durant la phase de transformation [24].

En plus, le bois est un matériau qui séquestre le carbone durant la durée de vie du bâtiment. En fait, 1 m<sup>3</sup> de bois séquestre environ 1 tonne de CO<sub>2</sub> [21]. En outre, l'esthétisme et la présence chaleureuse du bois dans les bâtiments joue un rôle positif dans l'amélioration du bien-être des occupants tout en offrant une régulation naturelle de l'humidité de la pièce et un confort thermique aux occupants [25]. En plus, le bois possède une excellente résistance thermique, son utilisation dans les constructions réduit les besoins d'isolation. En le comparant à l'acier, il est 500 fois meilleur et par rapport au béton, il est 7 fois plus isolant [23,19].

Un autre avantage du bois est qu'il est un matériau flexible, léger et facilement usinable. Il est quatre fois plus léger que le béton et par rapport à l'acier, il est dix fois moins lourd ce que facilite son déplacement et son usinage [23]. Il est utilisé dans les différents types des bâtiments (commerciaux, industriels ou institutionnels). Il permet en plus de faciliter la construction et la rendre plus rapide grâce à la fabrication hors site [21].

Le pourcentage de l'utilisation du bois dans un bâtiment dépend du type du bâtiment, des codes et des normes locaux, ainsi que d'autres facteurs tels que la disponibilité de ce matériau et les conditions climatiques. Actuellement il n'y a pas une limite pour définir le pourcentage de la présence du bois dans un bâtiment. En fait, techniquement il est possible de construire un bâtiment entièrement en bois, cependant il y a des exigences sécuritaires à respecter qui limiteront dans certains cas le pourcentage du bois dans le bâtiment [22]. Ces défis seront présentés dans la prochaine section.

### **1.1.2 Les défis de l'utilisation du bois dans les bâtiments**

L'utilisation du bois dans les constructions représente un défi d'ingénierie vu l'exigence des normes et des codes de construction [22]. En fait ces codes présentent une multitude des règles qui limite l'utilisation du bois comme matériaux de construction vu les caractéristiques particulières de ce matériau, par exemple, des règles liées à la sécurité incendie, à l'insonorisation, à la vibration ou encore à la limitation du nombre d'étages des bâtiments en bois [25]. Certaines règles sont difficiles à atteindre dans la construction en bois comme les règles de la sécurité incendie [27]. En fait, dans certaines constructions, il se peut qu'un élément construit en bois ne satisfasse pas le degré de résistance au feu que le code du bâtiment impose ce qui exige d'aller chercher des solutions pour améliorer cet indice, comme d'encapsuler le bois par le gypse ou de surdimensionner l'élément structural pour augmenter sa résistance au feu [29].

Un autre inconvénient de l'utilisation des structures en bois est leur insonorisation. En fait le bois est caractérisé comme un faible amortisseur, c'est un mauvais isolant acoustique. Pour qu'il soit utilisé convenablement dans les constructions, il faut qu'il soit accompagné par des méthodes d'améliorations d'isolation comme l'utilisation de multicouches ou de combiner le panneau bois avec un espace vide et un matériau absorbant ce que rend l'assemblage plus épais [30]. Au niveau du système structural des bâtiments en bois, certains inconvénients peuvent se produire comme les mouvements verticaux des étages du bâtiment. En fait la conception en bois multi-étages peut causer un risque de déformation de la structure à cause des charges de compression et de la déformation élastique du bois. Elle peut causer aussi un risque de tassement entraîné par les effets de la fermeture des espaces entre les éléments [3,31]. En outre, l'utilisation du bois dans les bâtiments peut causer la vibration des planchers. Ce phénomène peut produire de l'inconfort aux occupants, ou même du dommage structurel tel que des fissures dans les murs ou des déformations de la structure [32].

Un autre point limite l'utilisation du bois est les coûts reliés aux constructions en bois qui sont souvent plus élevés comparément aux autres matériaux (béton par exemple). Ces coûts concernent le coût du matériau lui-même, par exemple, les planchers en bois seraient 18 % plus coûteux que ceux en béton pour des raisons d'avancement de la recherche sur le matériau béton par rapport au bois [33] et ça peut concerner le coût de la maintenance des constructions en bois. Finalement, la disponibilité du matériau bois peut-être un frein pour son utilisation dans certains pays [27].

## 1.2 Les systèmes constructifs utilisés dans les constructions en bois

Différents types de systèmes constructifs sont utilisés dans la construction des bâtiments en bois. Tout dépendant du type de système, les éléments constituant un bâtiment ainsi que leurs caractéristiques diffèrent (charpente, dimension et type des poutres et poteaux et la connexion entre les éléments) et par la suite l'assemblage plafond à plancher varie. On présente dans cette section une brève description de trois types des systèmes constructifs : les systèmes en ossature légère, les systèmes en bois massif ainsi que les systèmes hybride.

### 1.2.1 Les systèmes en ossature légère

Un système en ossature légère est composé par plusieurs éléments standards qui forment la structure d'un ouvrage et assure sa résistance [23]. C'est l'un des systèmes constructifs le plus répandu au Québec, notamment pour l'habitation [34]. Connue pour sa légèreté, la construction en ossature légère est très résistante et efficace. Avec l'avancement et le développement industriel, les constructions en ossature légère intègrent de plus en plus différents types de bois d'ingénierie comme les poutrelles de plancher préfabriquées ou les poutres et les colonnes en contreplaqué laminé LVL (Laminated Veneer Lumber), ou en copeaux parallèles PSL (Parallel Strand Lumber) ou encore en copeaux lamellés LSL (Laminated Stand Lumber). Un exemple d'un tel système constructif en ossature légère est montré à la figure 1.1 [35]. Le code de construction du Québec ne permet à ce type de systèmes constructif que d'aller jusqu'à six étages de hauteur [36].

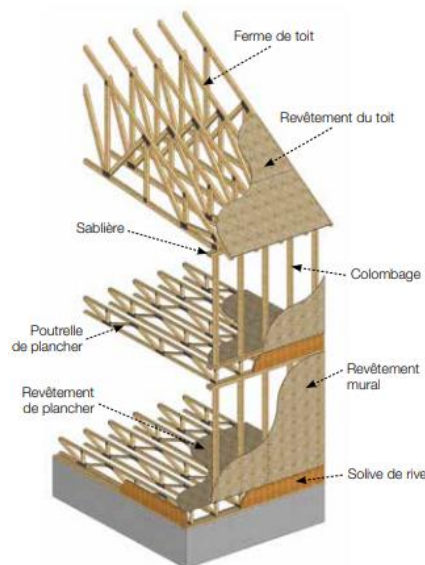


Figure 1.1. Système en ossature légère d'une charpente en bois [35].

Vu la particularité structurale des éléments constructifs de ce système, les éléments de la charpente qui font partie de l'assemblage plafond à plancher peuvent servir pour faire passer des éléments de la mécanique du bâtiment. Grâce à la configuration de la structure comme les poutrelles ajourées (figure 1.2), des conduites de faibles dimensions peuvent passer à travers les ouvertures permettant d'éviter les interférences avec la structure et offrant un gain en espace en évitant l'ajout d'un espace supplémentaire pour ces conduites.



Figure 1.2. Poutrelle ajourée entre deux étages d'un bâtiment [36].

Dans la figure 1.3 aussi, citée dans la référence [37], on montre bien qu'une structure à ossature en bois est flexible en termes d'encastrement des systèmes mécaniques. L'espacement entre les solives permet de créer un plénum aidant à installer les conduits [37].

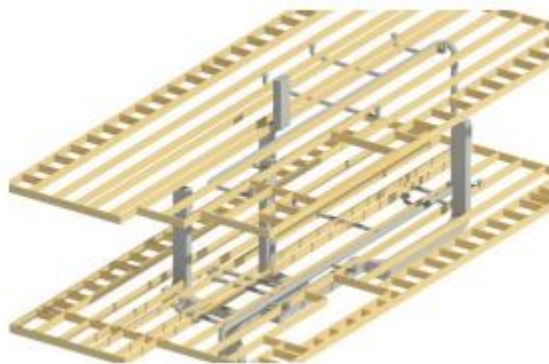


Figure 1.3. Disposition des gaines à travers une structure en ossature *en bois* [37].

### 1.2.2 Les systèmes en bois massif

Un bâtiment fabriqué d'une structure en bois massif est composé par des panneaux en bois massifs incluant notamment le bois lamellé cloué (nailed laminated timber ou NLT), le bois lamellé croisé (CLT) ou le bois lamellé-gougeonné (dowel laminated timber ou DLT) [38]. Les panneaux jouent le rôle d'une structure porteuse au sein d'un bâtiment. Ce type de bâtiment peut aller en hauteur jusqu'à 12 étages [39]. Deux exemples de ce type de bâtiment sont montrés à la figure 1.4 a. et à la figure 1.4 b. La figure 1.4 a. montre un assemblage sur chantier

des murs en bois massif et la figure 1.4 b détaille les composants structuraux d'un bâtiment en CLT (Murs et une partie de l'espace du plafond à plancher).

Ce type de bâtiment est connu pour la rapidité de sa construction, vu que les panneaux préfabriqués se montent sur le chantier avec une simple grue de levage. La structure est caractérisée par une stabilité et une solidité ainsi qu'une bonne isolation thermique [40].



Figure 1.4 a Construction en bois massif [23].



Figure 1.4 b Bâtiment en bois massif (CLT) [39].

Le système structural des bâtiments en bois massif peut être aussi formé d'une combinaison de poutres et de poteaux. Les poteaux supportent des poutres transversales, qui supportent elles-mêmes les planchers et la

toiture [38]. Les poutres et les poteaux peuvent être fabriqués en bois lamellé-collé (BLC / Glued laminated timber) et les planchers et le toit peuvent être faits en bois lamellé croisé (CLT) [41].

### 1.2.3 Les systèmes hybrides

Les systèmes hybrides consistent à combiner la structure du bois avec d'autres matériaux (acier, béton, différents types de bois) permettant de tirer profit des avantages de chaque matériau [42]. La figure 1.5 présente une structure hybride du système plafond à plancher. Le système est composé par des poutres et poteaux en bois massif avec une dalle en béton.



Figure 1.5. Construction hybride, système plafond à plancher bois-béton [26].

Comme décrit dans la section sur les systèmes à ossature légère, les poutres peuvent servir au passage de conduites. Ces poutres peuvent être construites d'une façon hybride. Les figures 1.6 a et 1.6 b montrent des poutres en bois-métal. Ce type de poutre est composé par du bois de petites sections et des connecteurs métalliques. Elles se caractérisent par la légèreté en les comparant à leurs équivalents en bois massif ou lamellé collé [27].



Figure 1.6 a. Poutrelles en bois-métal [27].



Figure 1.7 b. Poutrelles ajourées hybrides [27].



### 1.3 Les configurations des espaces plafond à plancher

L'espace entre un plafond et un plancher est aussi appelé « espace interstitiel ». C'est un terme architectural désignant toute la hauteur entre les étages permettant le passage des systèmes mécaniques et leur maintenance [43]. La présence de cet espace dans un bâtiment facilite l'entretien, réduit les coûts du cycle de vie, permet aux espaces occupés d'être plus organisés, facilite la construction et l'exploitation du local en dessous ou au-dessus, tout en offrant un accès plus facile aux systèmes mécaniques. La configuration de cet espace peut prendre différentes formes. Elle pourrait être sous forme d'un espace interstitiel complet, qui est un étage entièrement accessible à pied contenant tous les équipements des systèmes mécaniques. La hauteur de cet étage pourrait aller jusqu'à 2,7 à 3 mètres. Ce type de configuration est utilisé dans les laboratoires et les grandes usines. La figure 1.7 montre un exemple de tout un étage d'un espace interstitiel. La deuxième configuration est un espace moins volumineux que le premier, classé comme un espace interstitiel partiel ou encore un étage non complet, généralement utilisé dans les laboratoires et les logements occupés. La figure 1.8 montre un espace interstitiel partiel dans un laboratoire dans une école de médecine en Washington. Un troisième type de cet espace est défini par le nom passerelle (catwalk). Habituellement, c'est un espace localisé dans les corridors. Un exemple de ce type d'espace est montré dans la figure 1.9 [44].



Figure 1.7. Espace interstitiel complet [44].



Figure 1.8. Espace interstitiel partiel, Université de Washington [44].

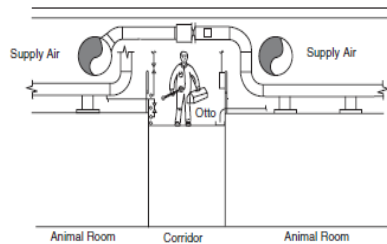


Figure 1.9. Espace interstitiel : type passerelle [44].

Dans les bâtiments en bois visés par cette étude, on s'intéresse au cas où les systèmes mécaniques sont soit en dessous des panneaux du plafond où les conduites et les tuyaux restent exposés, ou en dessous du plafond et caché par un plafond suspendu, ou en dessous d'un plancher surélevé [45] ou encore des systèmes intégrés au niveau de la structure en bois [46]. Les figures ci-dessous représentent des modèles pour les différentes configurations mentionnées précédemment. Les figures 1.10 et 1.11 montrent respectivement un réseau de tuyauterie et une partie de réseau de ventilation et des luminaires exposés sous un plafond en bois. La figure 1.12 montre une modélisation des systèmes mécaniques sous un plafond et cachés par un plafond suspendu en gypse. La figure 1.13 montre un plancher surélevé en dessous duquel passent les systèmes de la mécanique servant l'espace occupé en dessus. La figure 1.14 représente une modélisation de l'intégration des systèmes mécaniques tant au niveau de la structure qu'en dessous de celle-ci.





Figure 1.10. Système mécanique suspendu sous un plafond [47].



Figure 1.11. Système mécanique suspendu sous un plancher [47].



Figure 1.12. Système mécanique caché par un plafond suspendu [47].



Figure 1.13. Système mécanique caché par un plancher surélevé [47].

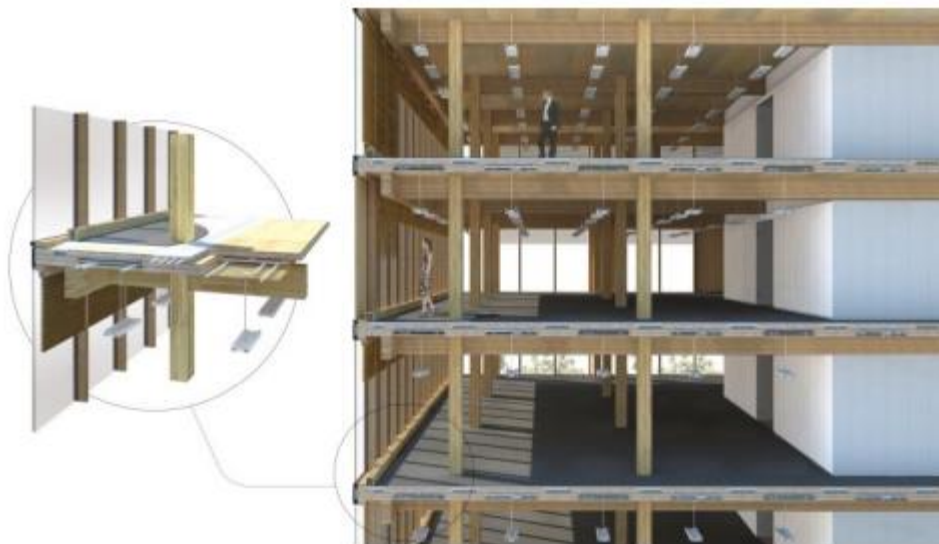


Figure 1.8. Systèmes mécaniques intégrés au niveau de l'assemblage plafond à plancher [46].

## 1.4 Les espaces plafond à plancher dans la littérature

Dans la revue de littérature effectuée, on a pu classer les études touchant les espaces plafond à plancher en trois catégories. La première s'intéresse particulièrement aux bâtiments en bois, où la structure de ce sandwich et ses aspects ont attiré le plus d'attention. En fait, plusieurs recherches se sont concentrées sur la modélisation et l'optimisation de cet assemblage dépendamment de la structure et de sa composition, comme l'insonorisation, la vibration, la résistance au feu, etc. (partie présentée et détaillée dans l'article 1 : chapitre 2 de ce mémoire).

Une deuxième catégorie de recherches concerne l'étude des systèmes de la mécanique du bâtiment localisés au niveau de l'assemblage plafond à plancher. Dans cette catégorie la structure a été prise en considération comme des bornes ou des conditions extérieures agissant sur le système mécanique étudié. Dans la partie 1.4.1, on présente quelques études sélectionnées, à titre d'exemple, sur des systèmes de chauffage au plancher, systèmes de refroidissement au plafond, système de distribution d'air en dessous de plancher, etc.

Une troisième catégorie d'études regroupe la conception assistée par ordinateur des bâtiments dont les systèmes plafond à plancher font partie. Cette catégorie d'étude regroupe la modélisation géométrique (2D et 3D) ainsi que la modélisation numérique des informations du bâtiment (BIM). Dans la partie 1.4.2, les outils utilisés pour la modélisation numérique et la coordination des éléments du bâtiment sont présentés.

#### **1.4.1 Modélisation et optimisation des systèmes mécaniques situés au niveau de l'espace plafond à plancher**

La position des systèmes de la mécanique de bâtiment varie d'un bâtiment à un autre à cause de plusieurs raisons, comme la conception du bâtiment, la fonctionnalité du système mécanique, etc. L'espace plafond à plancher a pu être le foyer de plusieurs types de ces systèmes tels que les systèmes de distribution d'air sous plancher, les systèmes de chauffage installés au plancher. On présente dans cette sous-section quelques exemples d'études sur ces systèmes.

Dans [48], les auteurs ont modélisé un système de distribution d'air en dessous du plancher (UFAD). À travers leurs études, ils ont développé une approche pour prédire la demande d'énergie de chauffage dans une maison résidentielle en simulant le fonctionnement d'un système de chauffage sous plancher. À travers un cas d'étude, les résultats montrent qu'il est avantageux d'installer des systèmes UFAD en termes d'économie d'énergie par rapport à des systèmes de chauffages conventionnels (17 à 25 % gain d'énergie de chauffage). Ils démontrent aussi qu'un plancher bien isolé (dalle avec matériaux d'isolation thermique) permet de minimiser 15 % de la charge de chauffage du bâtiment pendant l'hiver.

Dans [49], les auteurs ont développé un modèle CFD (Computational fluid dynamics) pour un système de distribution d'air sous plancher. Le système avait 10,7 x 24 in (0,272 x 0,6096 m) comme largeur et hauteur. Il a été validé par une série d'expériences sur une installation (plénum). Le modèle développé permet aux utilisateurs de prédire l'écoulement d'air et la distribution de la température à travers les systèmes de distribution d'air sous plancher. Il permet aussi de prévoir le flux de chaleur à travers la dalle structurale et le plancher surélevé, et ce, pour différentes conditions aux limites.

Dans [50], un nouveau modèle des systèmes de chauffage par le sol a été développé et validé avec des données bibliographiques. Le système de chauffage sous plancher a été comparé avec un système de chauffage convectif. Les résultats montrent que l'utilisation d'un chauffage par le sol permet une économie de 26% de la demande de pointe et une diminution de la consommation d'énergie du bâtiment d'un pourcentage de 30%.

Les trois études présentées dans cette sous-section ont été focalisées sur des systèmes de mécanique de bâtiment installés au niveau de l'espace plafond à plancher. Le but principal de ces études est purement lié à la performance énergétique des systèmes MEP. L'endroit où les systèmes de mécanique de bâtiment sont

installés (l'espace plafond à plancher) ne représente que des bornes limites encastrant ces systèmes et influençant dans certaines situations les performances énergétiques attendues dans les espaces occupés.

### 1.4.2 Coordination et modélisation numérique des éléments du bâtiment

Les éléments de la mécanique de bâtiment deviennent de plus en plus complexes, ce qui entraîne un besoin d'avoir plus d'espace et de coordination pour les installer. En contrepartie, les espaces disponibles à cet effet dans les bâtiments sont limités pour des raisons économiques et d'efficacité énergétique [47]. Les étapes de la coordination de ces systèmes MEP (Mécanique, électrique et plomberie) commencent depuis la conception préliminaire jusqu'à la phase de construction et se poursuivent jusqu'à l'occupation selon plusieurs facteurs et paramètres, comme les exigences du bâtiment et le budget du propriétaire, l'aménagement des systèmes MEP, les besoins de l'espace en fonction de la constructibilité, etc. La coordination des systèmes mécaniques, électriques et plomberie englobe la localisation des équipements, de même que l'acheminement des conduites, des tuyaux et des canalisations électriques d'une manière qui satisfait de nombreux types de critères différents [51].

Un processus de coordination traditionnel implique une série de réunions, au cours desquelles les représentants des différentes disciplines superposent leurs dessins afin de les comparer et ainsi détecter et éliminer les interférences entre les différents systèmes du bâtiment [52]. La figure 1.15 montre un exemple de modélisation traditionnelle des espaces d'un bâtiment pour une phase de début de projet. La figure donne une prévision ou encore une estimation des dimensions et des localisations préliminaires des différents éléments du bâtiment. Elle représente une partie d'un bâtiment d'un seul étage. L'espace réservé pour passer la mécanique du bâtiment est localisé sous le toit d'une dimension d'environ 0,854 m [18].

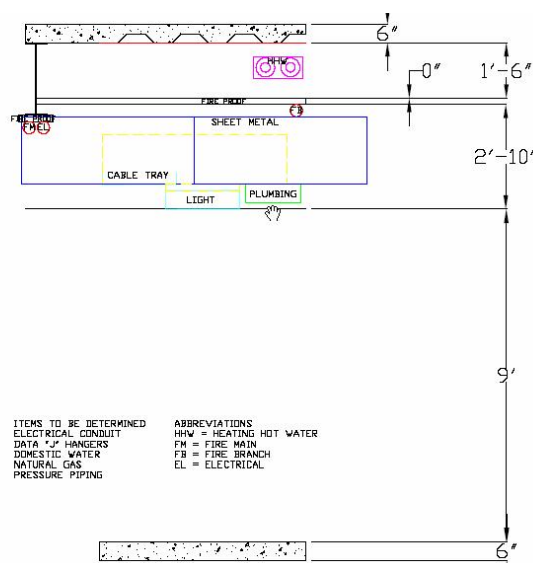


Figure 1.15. Identification des systèmes MEP, structure pour un point de départ dans un projet [18].

Aujourd'hui, avec l'innovation technologique, la coordination d'un projet de construction a évolué. Une coordination moderne et efficace des systèmes MEP (mécanique, électrique et plomberie) exige l'utilisation des logiciels de modélisation numérique et d'intégrer des connaissances liant la conception et la construction de chaque système du bâtiment. Une grande évolution a permis de passer d'une modélisation 2D traditionnelle vers des maquettes 3D (même 5D ou plus) réalistes. Différents logiciels sont utilisés comme Vectorworks, Autocad, Revit, ArchiCAD et BIM. Grâce à l'évolution continue de la technologie, ces outils sont capables de communiquer ensemble et d'échanger de l'information à travers des plateformes standards [53,54]. Ils représentent non seulement une technologie de représentation numérique des données des bâtiments, mais aussi une méthodologie d'organisation du travail. Ils permettent une vision de tous les éléments du bâtiment (plancher, espaces, murs, portes, fenêtres, poutres, colonnes, conduites, ventilateurs, etc.), ainsi que de bien spécifier leurs caractéristiques (matériaux, position, efficacité énergétique) [55].

Les figures 1.16 et 1.17 montrent une représentation géométrique tridimensionnelle d'un bâtiment. Dans la figure 1.16 les systèmes MEP sont représentés en vert en dessous du plafond et au-dessus du plancher. La structure du bâtiment est modélisée en noir. Dans la figure 1.17, on voit que l'espace entre les deux étages (entre le plafond d'un étage et le plancher d'un étage supérieur) a été alloué aux différents types de systèmes mécaniques (représenté en bleu et en jaune) ainsi qu'au système structural du bâtiment (représenté en gris).

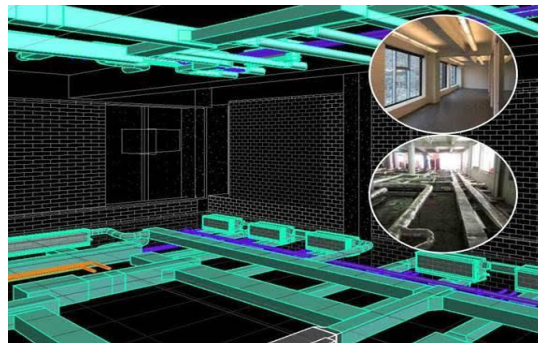
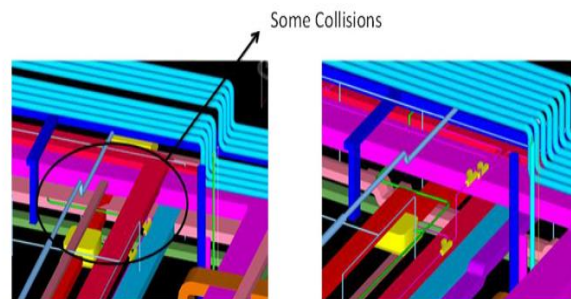


Figure 1.16. Modélisation des éléments du bâtiment [56].



Figure 1.17. Modélisation des éléments du bâtiment : MEP et structure [55].

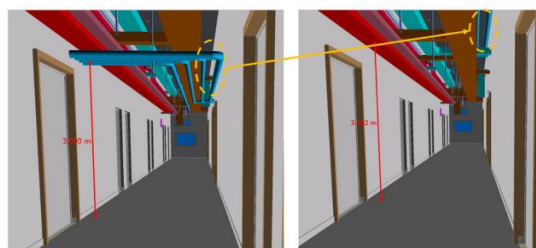
Ces logiciels de modélisation numérique permettent aux concepteurs d'utiliser leurs propres critères d'organisation des éléments du bâtiment pour avoir une représentation virtuelle d'un bâtiment à construire. À titre d'exemple, les systèmes de plomberie passent en premier, les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation sont considérés en deuxième lieu pour la taille importante de leurs composants, les systèmes électriques en troisième étape pour leur acheminement rigide, suivi de système de plomberie sous pression et de la protection contre l'incendie, puis les systèmes de contrôle en raison de leur cheminement flexible [51]. D'autres règles sont aussi utilisées, par exemple, un petit tuyau cède sa place à un gros tuyau, un composant moins cher cède sa place au plus chère, etc. Malgré ces différentes règles, des conflits entre les composants d'un bâtiment peuvent se produire. La figure 1.18 montre un exemple de conflit de coordination qui, grâce à la modélisation numérique, ce conflit a été détecté et éliminé dès la phase de conception, où les petits conduits ont été relocalisés sous la plomberie et les gros câbles [51].



a) Modalisation originale, b) Modélisation après coordination BIM

Figure 1.18. Coordination des systèmes MEP pour élimination des collisions [51].

Les problèmes de collisions et d'interférence entre les éléments d'un projet peut être automatiquement détectée à l'aide d'une fonction de détection des collisions intégrée dans les logiciels de modélisation. Le niveau de tolérance (distance entre les éléments) peut être ajusté en fonction des préférences de l'utilisateur, qui pourrait ainsi modifier la configuration des systèmes afin d'éviter la collision et améliorer la coordination [37]. La figure 1.19a montre un exemple de conflit entre les conduites et le plafond, où l'outil de modélisation numérique a permis de l'éliminer en déplaçant les tuyaux vers le haut (figure 1.19b) [51].



(a) Collisions après coordination, (b) Coordination après optimisation.

Figure 1.19. Coordination des systèmes MEP face à des contraintes d'espace [51].

À travers les différentes études consultées, on a pu souligner l'évolution des outils de coordination : d'une réunion entre personnes et superposition des plans issues de différentes disciplines vers des plateformes de modélisation numérique regroupant les différents intervenants d'un projet en même temps. Mais ça reste encore la coordination, un grand défi pour les concepteurs que pour les constructeurs des bâtiments, malgré le développement des outils numériques de préventions des collisions et des interférences entre les disciplines.

En conclusion, ce chapitre a présenté les avantages et les défis du bois en tant qu'un matériau de construction. Comme présenté dans la partie 1.2, une classification des différents systèmes structuraux utilisés dans les constructions en bois a été présentée en mettant l'accent sur la disposition des systèmes mécaniques par rapport à la structure au niveau de l'espace plafond à plancher. Ensuite, un bref résumé sur les études sur les systèmes de mécanique de bâtiment localisés au niveau de l'espace plafond à plancher a été présenté. La littérature présente plusieurs méthodes de modélisation de ces systèmes ainsi que des outils pour les optimiser, mais ces études se limitent aux performances liées aux systèmes mécaniques. Elles n'incluent dans aucun cas un objectif lié aux autres facettes du sandwich plafond-plancher comme, la résistance structurale, l'insonorisation et la résistance au feu, etc. Seulement, les outils de modélisation numérique présentés dans la section 1.4.2, englobent la multidisciplinarité de l'espace plafond à plancher et traitent les défis de la coordination entre les éléments du bâtiment (entre les systèmes de mécanique du bâtiment et la structure), mais ces outils restent des moyens de modélisation et non pas d'optimisation.

**CHAPITRE 2. CEILING-TO-FLOOR SANDWICH IN TIMBER BUILDINGS: COMPARING LITERATURE AND WHAT EXPERTS SAY ON DESIGN AND PERFORMANCE OF THIS MULTIFACETED SPACE.**



## Résumé

L'un des défis auxquels la construction en bois est confrontée est la hauteur des bâtiments. Dans certaines régions, la hauteur maximale autorisée par la réglementation est atteinte sans que le nombre d'étages souhaité soit satisfait. Pour relever ce défi, on peut tenter de minimiser l'épaisseur du système plafond-plancher. Ce sandwich joue différents rôles et doit répondre à une série d'exigences. Par conséquent, l'optimisation de cet espace nécessite l'étude de ses aspects tels que ses classifications structurales, son impact environnemental et les réseaux de conduits. Plusieurs intervenants sont impliqués dans sa conception, tels que les ingénieurs en génie civil, en mécanique et les architectes. En s'appuyant sur une revue de littérature et des entrevues semi-dirigées, ce document résume les aspects de l'espace plafond-plancher dans les bâtiments en bois. Il vise à définir ce volume et d'analyser ses propriétés et il met également en évidence les meilleures pratiques pour une meilleure conception.

## Abstract

One of the challenges that timber construction faces is building height. In some regions, the maximum height allowed by regulations is reached without satisfying the desired number of floors. To face this challenge, one can attempt to minimize the thickness of the ceiling-to-floor system. The ceiling-to floor sandwich plays different roles and must meet a series of requirements. As a result, optimizing this space requires the study of various aspects such as its structural classifications, acoustical insulation, environmental impact, duct and plumbing networks. Several stakeholders are involved in the design of this space, such as structural engineers, mechanical engineers, and architects. Based on a literature review and on semi-structured interviews, this paper focuses on the ceiling-to-floor space design aspects applied in timber buildings. This work aims at defining this volume and analysing its key properties. The paper also highlights the best practices that help to design this sandwich.

## 2.1 Introduction

The building and construction sector consumes around 36% of the world's energy. It also accounts for nearly 39% of the greenhouse gas emissions in the world, 11% of which are due to the manufacturing of building materials such as steel, cement and glass [1]. The environmental advantages of wood have thus generated a worldwide interest for timber buildings and yielded to the development of innovative constructive solutions [58]. In the province of Quebec (Canada), from 2007 to 2017, the use of wood in commercial, industrial, institutional, and multi-family constructions has increased from 15% to 28%. In other words, the share of wood has practically doubled in 10 years within this market [59].

The design and construction of timber systems can be challenging due to the requirements of building codes and the involvement of multiple actors from different disciplines such as mechanical engineering, architecture and structure [4]. In particular, multidisciplinary trade-offs are quite important in the ceiling-to-floor assembly. This space is unoccupied but has many functions and requirements in terms of structure, ventilation and acoustics, offering a high potential for optimization and integration. Many believe that reducing the space of the ceiling-to-floor assembly in timber construction can be an efficient way to reduce costs. What are the key functions and challenges associated with the design of this system? How is this space envisioned by the different building professionals? What are the best practices for designing this assembly?

This study aims to give an analysis of the current state of this assembly in wooden buildings, as well as to reveal the best practices for an optimum ceiling-to-floor sandwich. In brief, we present a summary of the literature that we reviewed on the theoretical, numerical, and experimental studies on this topic. Furthermore, we share the results of semi-structured interviews that we performed with expert architects, civil engineers, and mechanical engineers, highlighting the main ideas and best practices to properly design this sandwich.

In this paper we present ceiling-to-floor assembly aspects in timber buildings based on the methodology presented in Section 2.2. Then, reviewed articles related to vibrational, acoustical, environmental, and mechanical aspects are analysed in Section 2.3. Articles have been grouped according to the aspect that they treated. Subsequently, Section 2.4 presents semi-structured interviews outcome. Interview's result has been categorized depending on the information that they gave. Finally, Section 2.5 discusses and interprets the main achievements of this work, and a conclusion summarizes the accomplishment in the last section.

## 2.2 Research methodology

The research methodology is composed of two main parts. The first part presents the literature review. Several academic databases were used such as Google Scholar, ScienceDirect Web of Science, Compendex, and ResearchGate. Research on vibrational, acoustical, environmental and mechanical aspects were the focus of this review. To search articles, multiple keywords were used including "floor", "ceiling", "structural aspect",

“timber building”, “acoustical insulation”, “impact sound”, “airborne sound”, “timber floor environmental impact”, “structural classification”, “floor vibration performance”, “HVAC systems”. Forty articles were selected and analyzed. The most important studies are summarized in the next section.

The second part of this work is dedicated to semi-structured interviews with experts in the field. Six building professionals from different disciplines were interviewed to collect practical information about the ceiling-to-floor assembly, its characteristics in wooden constructions and the perceived challenges and opportunities in terms of design. The participants were selected according to their different expertise: two architects, two civil engineers, one structural researcher and one mechanical engineer. For these interviews, a list of questions was prepared and adapted to each expert’s experience in order to demystify the best strategies and challenges to achieve an optimum ceiling-to-floor space design. The interviews lasted between 30 and 45 minutes. The key results are discussed in the next section, such as the practical definition of this space, its components, dimensions, factors influencing its thickness, the current situation for the passage of HVAC related systems through this assembly and the advantages, barriers and challenges that actors face to optimize this sandwich.

An interpretation of the literature review and interviews outcomes will be presented in the last section in order to provide an analysis of the current situation of the ceiling-to-floor space in timber building and to highlight the major problems encountered by stakeholders to design this assembly.

## **2.3 Literature review**

This section proceeds with a review of relevant literature. It presents a brief definition of the ceiling-to-floor space as well as its structural classification, highlighting its multidisciplinary aspects such as the vibrational, acoustical and environmental features.

As a building part, the ceiling-to-floor-assembly or the «Interstitial space » is defined as an intermediate space located above a ceiling and beneath the floor above [60]. This assembly has a number of functions and requirements related to structure, ventilation, plumbing, acoustics and environmental characteristics, among others. It is a combination of structural and mechanical systems, and devoted to mechanical and electrical services distribution [44].

In timber buildings, ceiling-to-floor structural systems can be constructed completely or partially from wood materials. It can be classified into the following categories: heavy timber structure, light frame structure, or hybrid structure, which is a mixture of the previous systems or rely on a combination of wood with other materials such as steel and concrete [61].

Regarding the heavy timber structural systems, floors can be constructed from cross-laminated timber slab supported by glulam beams, or from massive timber panels. Regarding lightweight frame systems, ceiling-to-floor space can be constructed from a series of parallel joists, which support an attached structural subfloor. The

joists can be I-joists or perforated joists, Sometimes, for structural or aesthetic reasons, the floors systems can be constructed from multiple materials, such as a mixture of wood-concrete materials or an assembly of different constructive systems like a combination of heavy and lightweight frame systems structure [62].

Figure 2.1 shows a collection of examples of structural classifications applicable to ceiling-to-floor assemblies fully or partially constructed from timber.

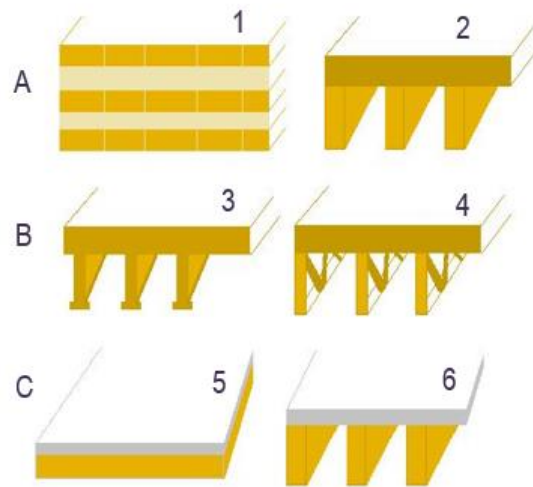


Figure 2.1: Schematic representation of ceiling-to-floor structural systems in timber buildings: (A) Heavy timber ceiling to-floor structural systems; 1 Massive timber floors (CLT); 2 Timber slab with BLC beam ; (B) Lightweight frame ceiling-to-floor structural systems; 3 Parallel I-joists with timber subfloor; 4 Parallel perforated joists with timber subfloor; (C) Ceiling-to-floor hybrid systems: Timber-concrete assemblies; 5 CLT floor with concrete slab; 6 Timber structure of glulam beams with a layer of concrete added on it. [adapted from figure 1. of [62]].

In preparing this review, different studies on the ceiling-to-floor systems in timber buildings have been found. As mentioned in Figure 2.2, research work can be classified into eight topics or categories. The first category is dedicated to the structural aspects. In fact, in the design of the ceiling-to-floor structure, two types of criteria must be verified: The Ultimate Limit States (ULS) and the Serviceability Limit States (SLS). The (ULS) ensure the safety of persons. The structure must support any loads such as live loads and dead loads. The Serviceability Limit States (SLS) represent criteria related to the suitability of the construction service such as floor deflection check [10]. The second category is about the connection of the ceiling-to-floor assembly to other building systems such as walls. The type of connection impacts building performance such as the air leakage levels in timber buildings [11-12]. Another important aspect of this space covered in literature is its resistance against fire. In case of a fire, the ceiling-to-floor sandwich must prevent the passage of flames and the transmission of heat between floors during a defined time assigned by building code [29]. A fourth category of studies addresses the vibrational aspect of this assembly in order to satisfy the comfort of occupant [67] and a fifth one, the acoustical

insulation [68]. In addition, this space plays an important role on improving building energy efficiency through, for example, improving the thermal insulation level between two adjacent rooms [17]. Furthermore, some articles have been focussed on the environmental impact of this sandwich in order to study its carbon storage ability and its greenhouse gases emissions impact [71]. Finally, a last category of studies is about mechanical, electrical, and plumbing (MEP) systems, which can be integrated in ceiling-to-floor space. These systems must be well designed in order to optimize building energy cost [72] as well as perfectly coordinated with the structure to avoid any interference and conflict between ceiling-to-floor elements [73].

All discussed aspects are fundamental in building construction elements, but occupant comfort is particularly sensitive to vibrational behaviour and acoustical insulation which are perceived as a way to define building quality level [74]. However, timber building elements can exhibit a lower performance in terms of acoustical insulation [75] and vibrational aspect do to wood lightweight [76]. This characteristic can hamper the development of timber construction elements [74], but on the other hand, the use of wood material in building constructions has increased due to the renewable, recyclable, and lower net environmental impact of wood compared to other materials[77].

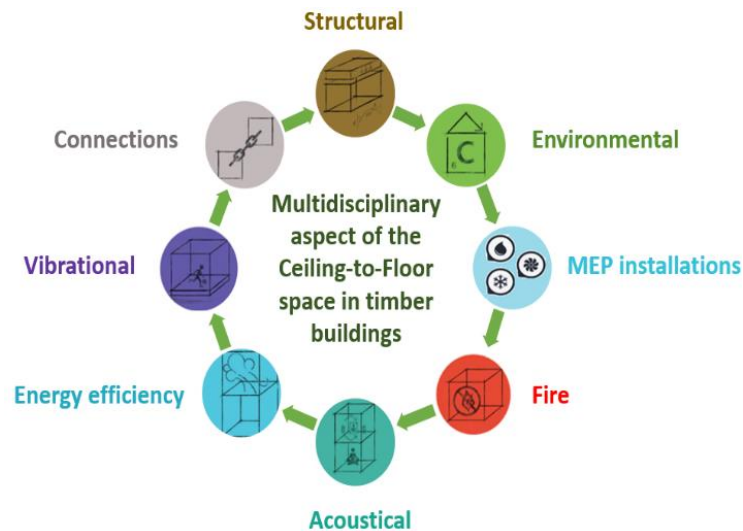


Figure 2.2 Different ceiling-to-floor aspects in timber buildings covered in the literature. [inspired from [78]]. In the next subsections, due to space limitations, we present a literature review oriented only on these four specific aspects (i.e., vibrational, acoustical, environmental impacts and MEP installations) of the ceiling-to-floor systems in timber buildings. We highlight studies and research that have been done to assess and improve these aspects in buildings.

### 2.3.1 Vibration performance

Vibration is a common phenomenon reported on many floors in buildings. It results from many sources such as, machinery, external traffic, or activity of occupant. It can cause discomfort and annoyance to humans or even malfunction of sensitive equipment [79].

In timber building, floors are more prone to vibrations owing to the lightness of wood. Vibration performance depends on floors surface layers, fittings or fixtures which influence floor stiffness, damping and mass, and as a result the natural frequencies of floor and the time to decay induced vibrations will be affected [76].

As a measure of acceptable wooden floors vibrational performance, codes and design guides specifies various methods that can be used and requirements to be met. In [62,80], the authors present an overview of traditional and recent design approaches used in designing floors under building service. Various design methods are presented and described such as the static deflection limitation methods, the subjective assessments-based methods, and the dynamic response-based methods. These methods correlate with floors type and the chronological development of testing standards.

We present here some examples of design requirements for three types of accepted timber floor vibration performance.

For a wooden joist floor, the Eurocode 5 requires three verification criteria. First the minimum value that the fundamental frequency of the floor can reach is 8 Hz. Second, the flexibility must be less than 3 mm / kN, and, finally, the velocity at an impulse of 1 Ns must be less than a threshold value[4,77].

For a CLT floor, the Canadian CLT Handbook 2019 [78], requires that the vibration-controlled span limit ( $L$ ) should respect Eq.(2.1), where  $((EI)_{eff})$  is the effective bending stiffness for a 1-m wide panel (calculated in the major strength direction) and  $m$  is its linear mass [78].

$$L \leq 0.11 \frac{\left(\frac{(EI)_{eff}}{10^6}\right)^{0.29}}{m^{0.12}} \quad (2.1)$$

For a timber-concrete composite floor (TCC), which is made of a reinforced concrete slab and a bottom layer of thick timber panels or heavy timber beams, the CLT Handbook guide 2019 [78] requires that the vibration-controlled span must be calculated using Eq. (2.2), where  $m$  is the mass per unit length of a 1-m wide of timber-concrete composite floor and  $(EI)_{eff}$ , its effective composite bending stiffness [78].

$$L \leq 0.329 \frac{((EI)_{eff})^{0.264}}{m^{0.206}} \quad (2.2)$$

To develop more knowledge on floors vibrational performance in timber buildings, various studies have been done. Several prediction models have been developed and multiple solutions have been proposed and tested to improve floor vibrational performance.

In [79], Glisovic and Stevanovic studied the vibration caused by movements of occupants in timber floors. They developed a numerical model based on the finite-element method. They studied the influence of multiple parameters such as the natural frequencies on floor vibration performances. They showed that a higher floor natural frequencies improve the floor vibration performances, and they demonstrate that the more spacing between adjacent frequencies is height better floor vibrational performance will be [79].

In [82], Jarnerö, Brandt and Olsson compared performance parameters of a prefabricated timber floor through both in-situ and experimental tests in laboratory with different boundary conditions. They showed that the floor damping ratio is very high in the in-situ tests compared to laboratory tests. This ratio increased from 1% to 6% when the timber floor is integrated into the building and to 5% when the timber floor is placed upon a polyurethane interlayer. They concluded that the coupling of floors with adjacent building elements is the major reason for the change in natural frequency and consequently in vibration performance [82].

In [83], Huang et al. studied the effect of beam spacing on CLT floor vibrational performance. Through both a numerical simulation and onsite experiments, the authors deduce that the floor natural frequency is increased by the increasing of the beam stiffness. Also, they show that the spacing between the supporting beams influences the control of the bending stiffness of the floor and consequently, the vibrational comfort level.

In other studies [32-34], authors proposed innovative assemblies to improve vibrational performance in composite ceiling-to-floor systems. For example, [33-34] studied the vibration behavior of steel-timber composite (STC) floors. They developed a finite-element (FE) model of the STC floor which has been calibrated and validated with experimental results. The model allows users to predict various parameters allowing users to test the floors vibration performance of an STC, such as the damping ratio and the floor natural frequencies.

### **2.3.2 Acoustical aspect**

The ceiling-to-floor system is one of the building elements through which noise can travel to interfere with daily activities [87]. Passing through this system, these noises can be classified into two types (airborne and impact noise).

The first one is the airborne noise. It is a noise coming out from any sound system such as discussions between people or television. It is transmitted by air. Sound waves are picked up and carried until they interfere with solid object like floors and vibrate through them [88].

The sound insulation level is measured in decibels. The louder the sound, the higher the dB level [87]. According to the Canadian National Building Code (CNB 2015), the airborne noise insulation level is quantified either by

the STC (Sound Transmission Class), which must be at least 50 dB and is determined from laboratory tests or by the ASTC (Apparent Sound Transmission Class), which must be at least 47 and is determined from building tests [75].

The second type is the impact noise or structural noise or shock noise is caused by a direct impact on the floor such as the movement of a person walking upstairs or falling objects. It is transmitted by the vibration of the floor and quantified by the impact insulation class IIC (Impact Insulation Class - IIC). The higher the IIC value, the higher the impact of sound insulation. The CNB recommends a value of 55 for the IIC [75]. The IIC is determined by experimental studies performed in a laboratory. It can also take the form FIIC to indicate that the tests were carried out in a building [89].

Generally, timber ceiling-to-floor systems do not show a high performance regarding acoustics insulation [90]. To overcome those limitations and achieve a comfortable level of noise in a room, several parameters can be modified, such as the mass of the ceiling-to-floor system, the connection between its elements, the type of its surface as well as the existence or not of a cavity in the assembly. In fact, the heavier, thicker, and more massive the materials of the assemblies are, the less vibration they cause and the more they block sound and provide inertia to the building which explains the existence of a thin concrete topping over a wooden floor structure. Furthermore, the presence of unprotected cavities in the building structure amplifies sound transmission. In addition, direct contact between rigid materials of the structure or floor finishes causes the transfer, and even amplification of sounds, so by dissociating high-density materials from each other with resilient materials, we ensure that vibration displacement is reduced. Also, smooth, hard surfaces reflect sound and create a kind of sounding board [75].

Various studies have been performed to predict the sound insulation level of timber ceiling-to-floor assemblies or to compare their acoustical performance with that of other assemblies (e.g., ceiling-to-floor systems composed of a combination of timber and other materials).

Asdrubali and al. [90] analyzed the airborne and impact sound insulation level of different types of ceiling-to-floor assemblies. They considered a classical assembly with a timber deck, and another assembly where the timber deck system integrates concrete or lightweight concrete. They proved that the best insulation results are obtained for both the concrete and lightweight concrete composite floors, and the classical timber floor possesses the worst insulation performance. Furthermore, they tested the response of the three systems to normative restrictions. They found that only the concrete timber system has the normative requirements, and the lightweight concrete composite floors cannot fulfill the normative restrictions unless a suspending ceiling is used.

In the same context of improving the acoustic performance of ceiling-to-floor sandwiches, Beresford and Chen [91] explored eight floor assemblies to improve the performance insulation of a CLT floor against both airborne



and impact noise. Systems have been tested in real environments. Models are made of CLT floors, timber I-joist floors, concrete floors, or the previous systems improved with a suspended ceiling or by a raised floor. The best performance results are given by the concrete floor compared to all wood floor configurations which did not achieve the required insulation level. In addition, the CLT floor improved by a suspending ceiling or by a raised floor performed better than the CLT and timber I-joist floor. As a result, the CLT floor required either a suspended ceiling or raised floor to achieve code compliance.

Additionally, Martins and al. [92] evaluated the acoustic performance (airborne sound insulation and impact sound insulation) of different construction solutions for wood and wood-concrete floors to determine their airborne and impact sound insulations. This time, experimental measurements were made in the laboratory on five systems. They included a wooden floor made of solid timber deck and glulam beams, then the same floors were reinforced with composite concrete, then a suspended ceiling was added to the previous systems. The insulation level was increased by adding either the composite concrete or the suspending ceiling. The wooden floor system still has a poor performance in the index of airborne sound insulation as well as impact sound insulation even with the addition of a suspended ceiling. Only the wood-concrete composite solutions with the suspended ceiling achieved the standard acoustic requirements [92].

Brunskog and Hammer [93] investigated the ceiling to floor systems using analytical models based functions of Green, to assess the airborne sound and impact insulation. Their model handled both single (one panel floor) and multilayer (panel floor with suspended ceiling) assemblies and was validated with experimental results. They studied the effect of different variables on the prediction of ceiling to floor sound insulation performances such as mass and stiffness of layers. The position and the direction of the load of the assembly have also been studied. The developed model was capable to predict the acoustic phenomena in the two types of the studied systems (single and multilayer systems).

In their work, Manh and Carl [94] aimed to evaluate the vibrational and sound transmission of a joist floor using finite element models and experimental tests. The floor has the same thickness as a typical concrete floor. The results validated the finite element model, but between 200 Hz to 630 Hz an unexpected peak in the impact sound levels has been detected in the measurements. In addition, compared to concrete floor, the joist floor gives a superior impact insulation level in the low frequency range [94].

### **2.3.3 Environmental aspect**

The environmental footprint of timber buildings has been documented extensively, emphasizing the benefits of the use of wood over other materials. Several research papers have been focused on timber building environmental impacts typically including all building elements [43-46]. Only two studies have been found to focus solely on the ceiling-to-floor assembly in timber buildings [9,18]. In fact, the use of wood as building

components has important benefits on the CO<sub>2</sub> emissions of a building. Compared to steel, concrete and aluminum, timber increases the pool of carbon stored in building systems and reduces the energy used in building manufacturing and construction [7].

In [95], a life cycle assessment on the production stage of a three timber buildings was carried out. Results show that the use cross-laminated timbers with a reinforced concrete participate in decreasing greenhouse gas emissions by 14.62% [95]. A similar finding showed that replacing concrete by timber in parts of a 43-storey building reduced the embodied energy without compromising the resilience of the structure. The study showed that the use of timber in building structural elements increased the embodied energy and led to a better thermal performance with a lower running cost for energy for the reason of low thermal conductivity of timber [96].

Always with the same methodology of comparing the environmental performance of building elements in woods and other materials, Haibo and Ying focused their attention on comparing the environmental performance between a concrete slab and a cross-laminated timber (CLT) flooring. They found lower emissions of climate-impact greenhouse gases was attributed to CLT flooring. Also they proved that concrete carbon storage is less important than CLT flooring [71].

Armand et al. analyzed three types of ceiling-to-floor assemblies. Their study compared the potential for global warming for joist, CLT and concrete floors. They found that joist floors had a low potential for global warming (<30 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>), which corresponds to almost a quarter of the warming potential of the concrete floor. Results showed also that CLT floors require a large amount of wood and are therefore less advantageous in terms of their environmental impact [64].

### **2.3.4 MEP installations through ceiling-to-floor assemblies**

As a building space, ceiling-to-floor assembly must be carefully designed due to its role in routing mechanical, electrical, and plumbing systems (MEP) [97]. It provides a pathway for MEP systems which can be installed either hidden by a dropped ceiling or below a raised floor [98]. Various parameters related to the MEP systems influence the ceiling-to-floor space dimension such as ductwork dimension, piping, light fixtures, insulation thickness around ducts, sprinkler heads. [97]. These systems must be perfectly coordinated with one another and with the structural systems to avoid any conflict, interference and collision, which are one of the most critical issue with this space during construction [19]. For example, a beam can interfere with an air distribution duct for the HVAC system. This can impact both construction time and system installation efficiency, and consequently cost. To identify these problems and eliminate them from the construction phase, the use of 3D «Building Information Modeling (BIM)» which includes architectural, structural and MEP systems can be beneficial [99]. This technology offers a virtual platform where design engineers, architects and contractors can interact from the beginning of a project to improve the coordination between elements. As a consequence, the BIM approach

can avoid interference between the structure, ducts and plumbing systems [73]. However, even though BIM helps to plan, design, and maintain buildings elements such as the structure and MEP systems, its role is not to formally optimize the ceiling-to-floor.

Several research articles have been focused on optimizing the MEP systems of the ceiling-to-floor assembly. Some papers studied, for example, the geometry of the ductwork [100], while others optimized the air distribution system layouts [72] or the cost of these systems [97,102]. However, no study was found to include the interaction with the structural design of the ceiling-to-floor space in the MEP optimization.

## **2.4 Semi-structured interviews**

This part of the paper is dedicated to the semi-structured interviews results. It presents the most important information collected during the meetings which have been recorded and transcribed into word files. The most relevant data are discussed and presented in this section. We start by providing the different definitions attributed by interviewers to the ceiling-to-floor space in timber buildings. Then, factors influencing the choice of the structure and the thickness of this space will be presented. Furthermore, the position of MEP systems through this sandwich will be demystified. Finally, challenges and opportunities identified by the experts will be presented.

### **2.4.1 Definitions of ceiling-to-floor space**

According to the interview outcomes, the ceiling-to-floor assembly includes three main functions: architectural, structural and mechanical (HVAC). According to the position of each expert (architects, mechanical engineers, civil engineers) several definitions have been attributed to this space. Figure 2.3 summarizes the most important definitions and classifications proposed for this space by the experts. The participants provided various and complementary definitions depending on their disciplinary backgrounds. Some definitions are based on the composition of the assembly, others on its functionalities, and some on the service offered to the below space. From the civil engineering perspective, the ceiling-to-floor sandwich was seen as the space encompassing different structural elements squeezed between finishing planes. In mechanical engineering, the sandwich is seen as a service space for plumbing, ventilation, electricity, artificial lighting and sprinklers. The architectural vision aims at integrating the different functionalities of the ceiling-to-floor space into a coherent system that divides floor spaces. In summary, the ceiling-to-floor assembly is a multidisciplinary space. It can be defined as a volume limited by the flooring panel and the ceiling layer. It had various functions and is made up of various subsystems such as the structure, sound insulation materials, control fire resistance systems, and heating, ventilation, and air conditioning systems (HVAC).

## 2.4.2 Ceiling to floor structural choice

According to the experts, the geometry of the ceiling-to-floor spaces can vary significantly from one building to another, often for structural reasons. In fact, there are some types of structures that cannot be exposed, either for aesthetics or due to fire protection regulations. In that case, a suspended ceiling will be added to hide the structure or to meet the required fire resistance. For example, usually, in a light frame wood structure, the wood structure fire resistance does not offer the required building code requirements, forcing the use of a suspended ceiling under the structure (often made of gypsum). On the other hand, for glued laminated timber or cross laminated timber, structural systems can stay visible. The wood in this case will bring aestheticism to the building and at the same time, provide an additional interior space since there is no need for a suspended ceiling. Sometimes, for technical reasons, a sub-ceiling or a suspended ceiling can be added (for example to hide mechanical and electrical systems), and in other cases systems can be visible under the ceiling and the only changes will be on the type of pipes used for both aesthetics and fire protection reasons.

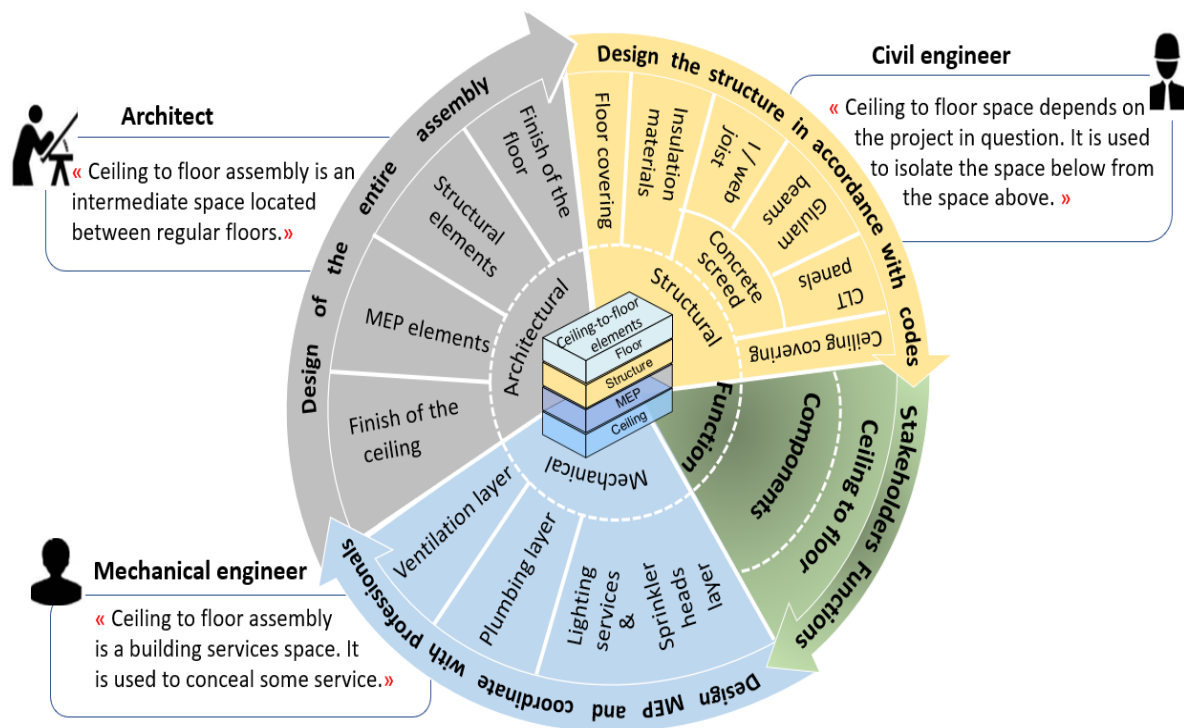


Figure 2.3. Main definitions of the ceiling-to-floor assembly according to semi-structured interviews.

## 2.4.3 Factors influencing ceiling-to-floor thickness

As explained by interviewees, in a timber building, the thickness of the ceiling to floor space is obtained by adding all components that it must contain. Usually, the first step in a building floor design is to define the distance between each floor: the slab-to-slab distance. After that, ceiling-to-floor elements will be added. The dimension in this case will depend on several things, such as the type of occupation that is below, the height

criteria required by building codes, the type of structure and the arrangement of MEP elements, which can be visible below the ceiling or hidden with a suspended ceiling. The total thickness is obtained by adding all the subsystems that should be considered.

#### **2.4.4 Position of MEP subsystems through timber ceiling-to-floor assemblies**

According to the participants, in a standard building, plumbing (drainage, stormwater, domestic water piping, network), ventilation ducts, and heating and air conditioning systems are the main mechanical components. The arrangement of this mechanical network through the ceiling-to-floor space depends on the structure. With a heavy timber system, mechanical systems can stay visible below the ceiling where large ducts pass through corridors. When one wants to serve a room, the beams must be drilled, or the duct should pass underneath the beam. Regarding lightweight timber frame structures, small ducts can pass through the openwork joists.

#### **2.4.5 Challenges and opportunities in terms of ceiling-to-floor space optimization**

As mentioned by most of interviewees, the position of MEP systems in the ceiling-to-floor space represents one of the main challenges and is at the origin of conflicts during the building construction phase. In fact, duct networks intersect with structure components in this space due to several factors such as the type of structure, the dimensions and the layout of the ducts/pipes, or due to the limited space allocated to the mechanical systems.

According to experts, the optimisation of the ceiling-to-floor space can bring advantages on two main axes: volume and cost. In fact, space gain can lead to a reduction of the required envelope material, which will be reflected by energy savings and by cost gain benefits.

In order to optimize this space and achieve a good trade-off, experts recommend the use of the BIM approach to facilitate collaboration between stakeholders and to better organize the duct and plumbing networks. Also, a combination between heavy and a light timber frame system can be both economic and aesthetic. Finally, in terms of space organisation, bringing elements together and the use of structure with materials having an important elastic limit can help to design a thinner ceiling- to-floor sandwich.

## **2.5 Discussion**

This section compares the key findings from the two main steps of this work: literature review results and semi-structured interviews findings.

Based on the previous sections, it is clear that the ceiling-to-floor space in timber buildings requires special constructive attention. Various theoretical and experimental studies have advanced the understanding of what affects different facets of ceiling-to-floor performance. Furthermore, several types of models have been

developed in the literature to simulate and design this space. However, most studies in the literature focused on only one facet of the sandwich at a time (e.g., its acoustical performance). On the other hand, the semi-structured interviews revealed that the efficient design of this space must combine all of these different aspects simultaneously, and this is actually a significant challenge. In other words, the ceiling-to-floor assembly is a space of multidisciplinary trade-offs. Its different features are interdependent and must be considered together to achieve good results.

Another important point emphasizing the difference between theory and practice is the design and modelling of the ceiling-to-floor space itself. Literature represents this space and its features mathematically or through prototypes or even through in situ experiments to optimize its various aspects, but typically the MEP systems are not considered in this sandwich. On the other hand, all interviewees recommended the use of design tools (i.e., BIM) which allow designers to combine the MEP systems representation with other building components. In this case, the ceiling-to-floor space will be better modelled, and all its elements will be considered in the design. According to participants, this method can avoid the major problem of the ceiling-to-floor construction, which is the interference between the structure, ducts and MEP systems. However, there is currently no tool for the formal multifaceted optimisation of the ceiling-to-floor space.

As a conclusion, even though literature and practical tools cover different aspects of the ceiling-to-floor assemblies, they tend to address, study and optimize them independently. Furthermore, BIM can be a solution to coordinate different aspects at the same time, but it is a design tool and not an optimisation solution for the ceiling-to-floor space.

## **2.6 Conclusion**

This paper presents a state of the art of the multiple facets of the ceiling-to-floor space in timber buildings. As presented in the literature review section, a classification of its different structural systems was presented, and studies of its environmental and acoustical aspects were introduced. Literature shows that ceiling-to-floor space must respect various constraints in order to meet building requirements. Subsequently, semi-structured interviews with different experts involved in the construction of this space were conducted. Interviews aimed at demystifying and highlighting good practices, expectations, and perspectives regarding the design of this space.

A comparison between the literature and the interviews revealed the lack of studies in which MEP systems were integrated into the space, whereas this integration represents one of the major current challenges. Furthermore, the literature does not currently offer multidisciplinary models and optimization tools that could integrate simultaneously all the important facets of the performance of the ceiling-to-floor sandwich (structure, acoustics, environmental footprint and MEP integration). Developing such a platform could potentially allow reducing the volume of this space, and thus reduce costs.

**CHAPITRE 3. MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF CEILING-TO-FLOOR SYSTEMS IN TIMBER BUILDINGS TAKING INTO ACCOUNT STRUCTURAL AND HVAC RELATED OBJECTIVES.**

## Résumé

La conception de l'assemblage plafond-plancher dans les bâtiments en bois peut être un défi en raison de ses aspects multidisciplinaires, ce qui impose des exigences normatives lors de sa conception. Dans cet article, nous présentons une stratégie d'optimisation multi-objectif visant à concevoir et optimiser l'espace plafond-plancher dans les bâtiments en bois dont un but de minimiser son épaisseur et la perte de pression dans un réseau de distribution d'air qui passent dedans. Une étude de cas a été effectuée, où trois configurations sont considérées. Dans la première, le diamètre d'une ouverture dans une poutre est limité à 15% de sa hauteur, Puis, 30% de sa hauteur et finalement aucune ouverture n'est autorisée et les gaines passent sous les poutres. Les résultats montrent que l'algorithme d'optimisation donne de meilleurs résultats en termes d'épaisseur et de perte de pression dans la troisième configuration comparé aux configurations où les gaines traversent la structure.

## Abstract

The design of compact ceiling-to-floor systems (CTFS) in timber buildings can be challenging involving different disciplines in a sequential approach, each facing potentially conflicting objectives and constraints. In particular, the CTFS contains structural components such as beams and floors, and is also used for the passage of mechanical, electrical and plumbing (MEP) elements providing various services to occupied zones. An integrated design of CTFS in which different disciplines are considered simultaneously could improve its overall performance. In this paper, a multi-objective optimization strategy is presented aiming to design and optimize ceiling-to-floor space in timber buildings. By focusing on both structural and ventilation systems, the framework involves the minimization of the assembly thickness and the pressure drop in the air distribution ductwork. The NSGA-II algorithm is used in the process of solving the optimization problem. Three possible configurations of beam-duct interactions are considered: (i) the diameter of an aperture in a beam to let a duct pass is limited to 15% of the beam height, (ii) the aperture diameter limitation is 30% of the beam height, corresponding to a beam with reinforcement, (iii) no apertures are allowed, and the ducts are below the beams. For the case study, results show that the optimization algorithm gives better results in terms of thickness and pressure drop in the third configuration, compared to the configuration where ducts pass through structure.

*Keywords:* Timber ceiling-to-floor; NSGA-II; multi-objective optimization; air distribution systems; Nondominated solutions, Pareto front



## 3.1. Introduction

### 3.1.1 Context

One of the issues that has plagued the design and construction of buildings for a long time is the improper coordination between stakeholders as there are often many professionals involved in building construction process, including architects and engineers. This can cause issues such as incompatible systems or lack of space or even last-minute changes in the design. In a typical building project construction process, architects define building geometry, layout and envelope assemblies, while structural engineers size the components of the structure. This imposes spatial constraints and limitations on the HVAC (Heating, ventilation and air-conditioning) components (e.g., ducts, piping, etc.), and more specifically MEP (mechanical, electrical, plumbing) components, for mechanical engineers. During construction, contractors must often use their experience to organize the construction sequence and decide on the exact routing paths for ducts and pipes, which in the end can impact negatively building performance [103].

To organize and package building systems, special spaces such as mechanical shafts are used to route various services either vertically or horizontally. Although invisible to occupants, these spaces play a critical role when it comes to providing them with services [104]. In particular, the ceiling-to-floor sandwich (CTFS) defines a key space in which many components and services are located (e.g., ventilation ducts, pipes, electric wires, IT, lighting, fire protection systems, beams, slabs, etc.), which can lead to interferences during design and construction phases (e.g., when a duct needs to pass through or below a beam). In turn, avoiding interferences can necessitate more volume for the CTFS. Since the CTFS is repeated every floor, limiting its thickness as much as possible has a strong potential to reduce the required amount of construction materials and cut costs. It can also help to limit the overall building height, which can be crucial under some local regulations. Optimizing CTFS design is thus crucial, but it proves difficult due to the number of components and disciplines that it involves and the lack of proper tools to do so. A previous literature review and interviews with key stakeholders confirmed this situation [105].

Below, a description of recent studies on design optimization of MEP components within the CTFS is provided (Section 3.1.2), followed by a presentation of design optimization of CTFS structural elements (Section 3.1.3). As will be seen, there is currently no integrated method to optimize CTFS while considering simultaneously the performance of the MEP systems and of the structure, as well as their interactions, as most optimization approaches focus only on one of these aspects at a time.

### 3.1.2 MEP design optimization

Different MEP and HVAC systems can be integrated in the CTFS such as air distribution, floor heating, ceiling cooling, etc. A proper design and integration of these components within the CTFS can greatly impact the overall energy efficiency and indoor environmental quality of the buildings, which is why different models and design optimization approaches have been elaborated to assist designers.

For example, Kattan et al. [106] developed an integrated model of an underfloor heating system and showed that UFHS can offer a 30% reduction in energy consumption compared to convective heating systems for the same comfort level. Yuan et al. [107] elaborated a radiant ceiling system model. Their study focused on operation limit range for both heating and cooling service allowing designers to optimize occupant comfort and system efficiency. In Ref. [108], Jin et al. developed a Computational Fluid Dynamics (CFD) model of an underfloor air distribution system allowing to predict airflow and temperature distribution in the plenum. The findings helped to optimize energy efficiency and comfort.

Jorens et al. [109] present different design methods that have been developed to design and optimize air distribution systems, which is typically the MEP system occupying the most space in CTFS. Large duct diameters help reducing fan power requirements, but practical considerations limit the actual size of ductwork in practice such as costs, compacity, etc. Jorens et al. classified sizing methods into two categories. The first represents heuristic design methods which are based on assumptions on air flow velocity or friction losses to size duct sections and fans. The static regain method and equal friction method are the most widely used in this category. However, even if these methods provide a satisfactory design, there is no guarantee that they offer an “optimal solution”. The second category is methods relying on formal optimization approaches such as dynamic programming or metaheuristic techniques. For example, Kritmaitree [110] presents the T-method, which is one of the most known duct optimization methods. This design methodology is based on dynamic programming. It allows users to size ducts and fans to minimize the life cycle cost of duct systems [111]. Similarly, Asiedu et al. [101] used a genetic algorithm to design a duct system and minimize its life-cycle cost. Their design methodology respect duct size and flow constraints and allows users to achieve an economically efficient ventilation system. In a more recent work, Jorens et al. have developed an optimization method in which they integrate the choice of the layout in the minimization of the total cost of an air distribution system. Through a test case, they present best solutions of duct layout leading to a minimal system cost [112]. Kim et al. [102,113] developed a design procedure to optimize variable air volume (VAV) duct systems. By considering the hourly airflow rate, fan characteristics and duct static pressure, duct size and velocity constraints, the research work accentuates the importance of design systems airflow variation on life cycle cost saving. Through several VAV duct systems, the authors have compared their design methodology with other duct design methods (such as static regain, equal

friction methods), where the VAV optimization procedure offered the best results in terms of life cycle cost savings.

Despite advances in MEP and HVAC design optimization, no study identified during the literature review analyzed the interaction of such procedures with structural components in the CTFS, nor the necessity to minimize the volume of the space encompassing MEP systems in CTFS, and in particular ducts, which are the most critical in terms of size.

### **3.1.3. CTFS structural considerations**

The design of an efficient CTFS can be difficult in any building, but the challenge can be even more acute in wooden constructions (which is of interest in the present work). First, they typically have a primary direction for conducting building services, which makes 90-degree routing difficult, with pipes and ducts positioned either under beams or through them. As in concrete and steel buildings, dropped ceiling can be used to hide the ceiling-to-floor space, but in wood buildings, it can be desired to expose the structure for aesthetic reasons [114]. Another challenge related to the structural role of CTFS in timber buildings compared to other buildings is that the weight of a CTFS wooden assembly can be too small to satisfy building vibration comfort level [115] or fire resistance requirements [116] or even sound insulation [117]. In that case, the addition of other materials like concrete can help CTFS system to better exploit both material properties and satisfy building requirements [118].

In that context, several authors worked on optimizing ceiling-to-floor structural components aspects. Yeoh et al. [119] gave an overview of the advantages of composite floors. They discussed the standards and design methods, as well as the influence of concrete properties on such assemblies. In fact, combining concrete with timber improves building acoustical separation, reduces mass and load imposed on foundation and as a result, reduces seismic action [119]. An optimal production cost of the design of a timber concrete composite floor has been recommended by Jelusic and Kravanja [120] with the help of a multi-objective optimization algorithm. In their model, the structure was subject to satisfying building code requirements through respecting ultimate and serviceability limit state taking into account various design variables such as timber and concrete strengths, vertical loads imposed on the structure, different cross sections, and structure spans.

### **3.1.4. Integration of MEP and structure in CTFS**

In our literature review, we tried to identify studies on CTFS design optimization focusing on more than one aspect or more than one discipline. Only one study was found. It considered the thickness of the ceiling-to-floor assembly as an objective function [4]. In that study, the authors optimized simultaneously environmental aspects and vibration comfort, in addition to the thickness of the assembly. However, no interactions with the MEP systems (e.g., ventilation ducts) were considered. This can limit the practicability of the solutions, since ducts

can occupy a significant portion of the CTFS and duct-structure interferences are a major source of issues during construction.

The emergence of Building Information Modeling (BIM) in the industry offers new opportunities to facilitate the coordination among different specialists in the design phase. In particular, interferences of MEP components, such as ducts and pipes, with other building components can be reduced through BIM based on different criteria [51,121]. Even though such studies demonstrate the potential of BIM and of a better coordination between stakeholders, no systematic and automated design optimization approach exploiting the synergies and integration between ducts and structure was found.

### **3.1.5. Contribution of the present work**

As can be seen, most of the studies aiming to optimize CTFS consider only one facet of the ceiling-to-floor space. None integrates the interactions of the structure with the building services located between the ceiling and the floor. However, to reduce this space as much as possible and avoid undesired interferences, it is needed to consider these potential interactions. Consequently, there is a need for developing a multi-objective optimization approach to design ceiling to floor assemblies that are compact, structurally sound and energy efficient. The novelty of the present paper is to introduce such a multi-objective optimization formulation to design ceiling-to-floor spaces while considering two of the most important facets. The focus was put on the integration of ductwork, which is the most voluminous MEP system, with the structure since undesired interferences between these systems were often reported in literature.

Due to its popularity, a wood-concrete composite floor assembly is considered, although the approach introduced in the paper could easily be extended to other structures. The two objectives functions that are minimized simultaneously by the proposed approach are the thickness of the assembly and the pressure drop in the air distribution systems. Different constraints are invoked to model the interactions between the ducts and beams, and ensure that the structure respects the applicable construction code. The proposed optimization framework allows to identify the best CTFS options in a given situation. Through different test cases for which the proposed method was applied, the paper is able to show explicitly the best CTFS configurations based on compactness and power losses.

The proposed workflow of the present paper is summarized in Figure 3.1. The literature review revealed the lack of tools to optimize at the same time different facets of CTFS. Then, the CTFS design optimization framework developed in this work is detailed in Section 3.2. This includes a mathematical model of the structural components of the CTFS and a model of the ductwork that is contains, which define a series of constraints that any CTFS design must respect. The methodology then presents how the two objectives functions (i.e., (i) thickness of the CTFS, (ii) pressure drop in the air distribution system) are calculated and minimized at the same

time, based on the multi-objective optimization solver the NSGA-II. The proposed framework is tested through a case study that is introduced in Section 3.3. Results are presented and discussed in Section 3.4, where Pareto fronts and optimal configurations are analyzed. Finally, a conclusion section outlines the main contributions of the paper and the future perspectives.

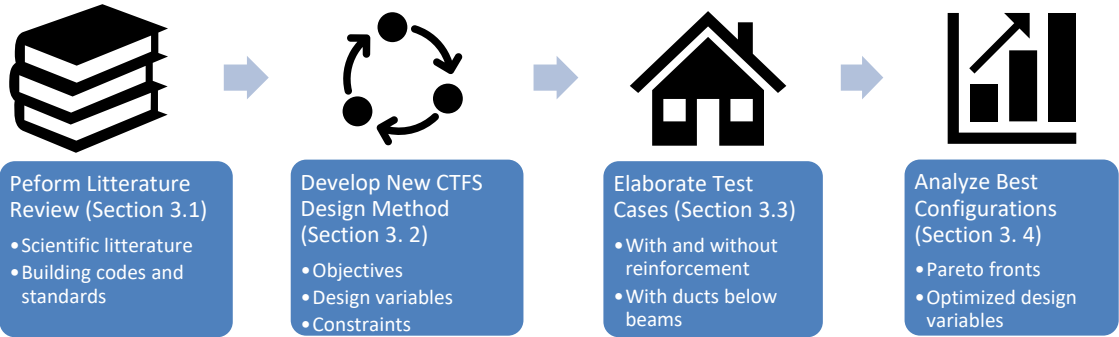


Figure 3.1. Workflow diagram summarizing the main steps followed in the present paper.

### 3.2. Materials & Methods

As mentioned above, we focus on two simultaneous objectives to optimize ceiling-to-floor assemblies: (i) minimizing the thickness of the ceiling-to-floor assembly, (ii) minimizing the pressure drop in the air distribution system. The ceiling-to-floor assembly that is considered in this work is shown in Figure 3.2. Its structure consists of a concrete screed resting on CLT panels which are supported by glulam beams. This particular design was often chosen to take advantage of the concrete layer to improve vibrational comfort, sound insulation, fire resistance and strength. The present section explains how the ceiling-to-floor system was modeled and optimized. Section 3.2.1 describes the structural modeling of the ceiling-to-floor system of Figure 3.2. Essentially, this structural model corresponds to a series of constraints that the CTFS design must meet. In Section 3.2.2, the modeling of the ductwork is presented, allowing to calculate the pressure drop in the duct layout. Finally, the optimization problem is formulated, and the adopted optimization technique is introduced in Section 3.2.3. Figure 3.3 summarizes the overall methodology of the proposed design framework with the design optimization approach on the left-hand side and the procedure for calculating constraints and objective functions on the right-hand side. Each part of that figure will be explained in the following subsections.

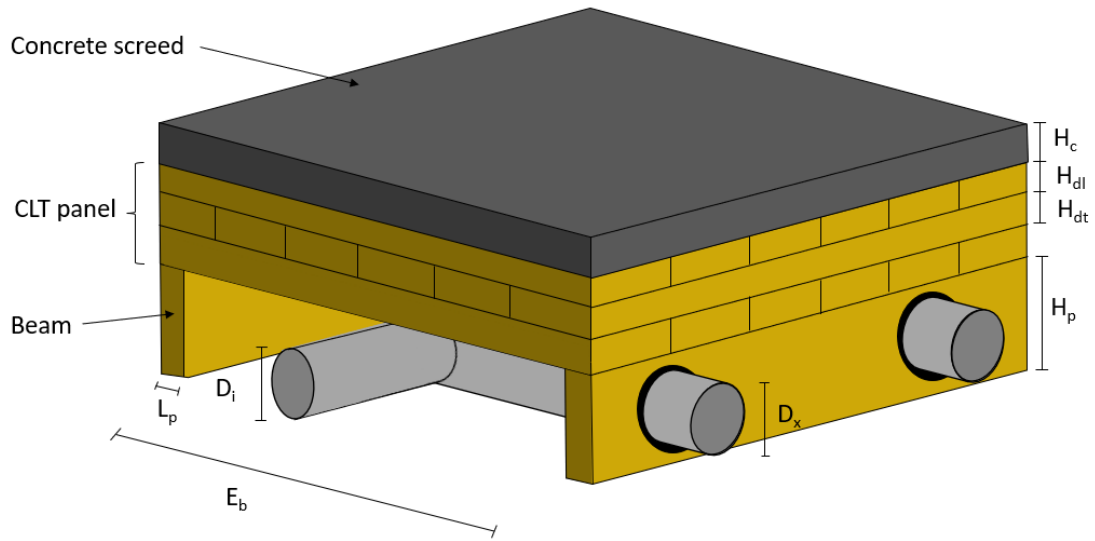


Figure 3.2. Schematic representation of the ceiling-to-floor assembly optimized in this work.

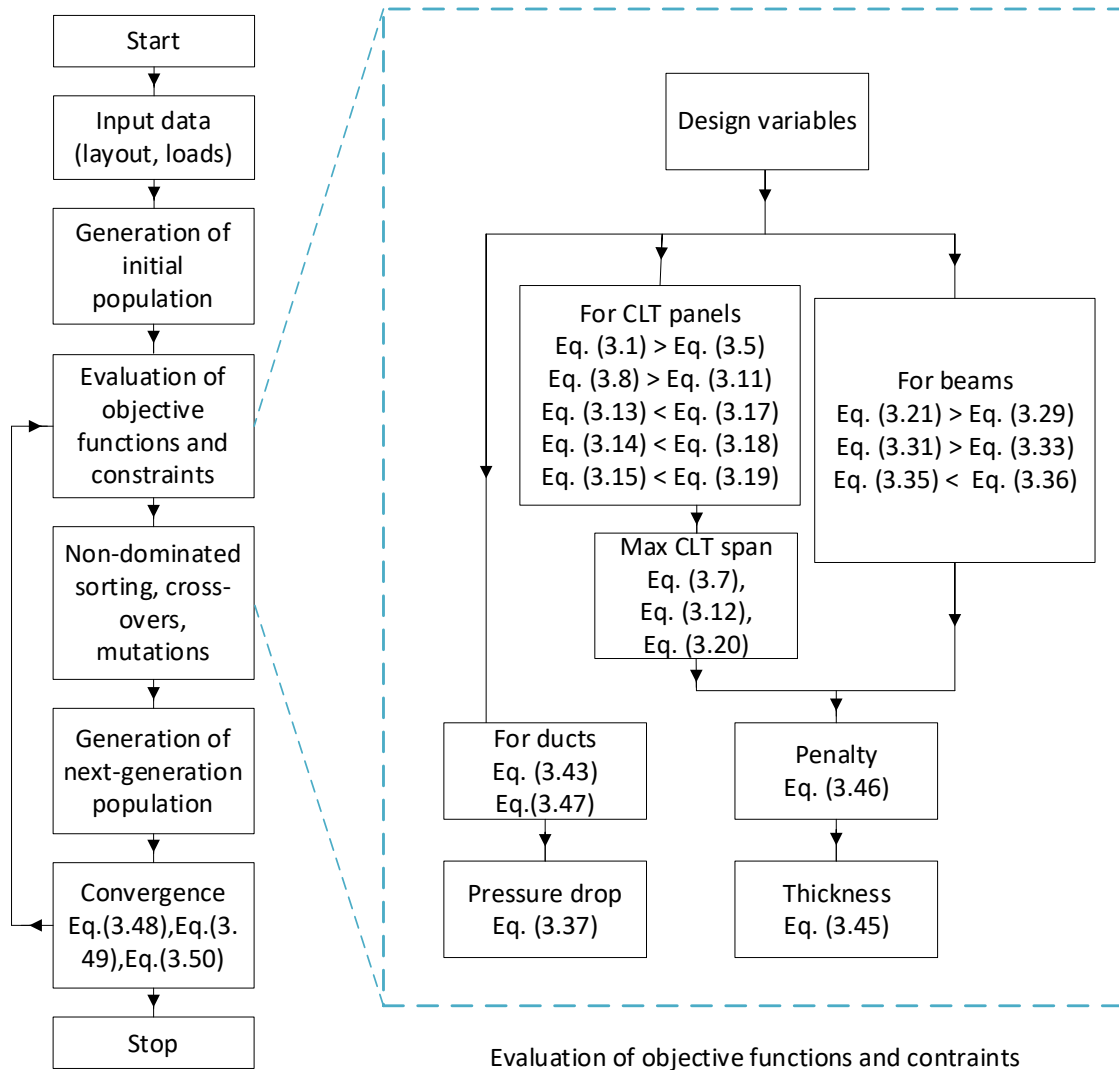


Figure 3.3. Workflow diagram illustrating the design optimization approach (left-hand side) and procedure for calculating constraints and objective functions (right-hand side).

### 3.2.1 Structural modeling

The ceiling-to-floor structural model is based on CSAO86 (a standard in which requirements for structural wood system design are presented) and on the Canadian CLT handbook [122,123]. For more information on the equations presented below, the reader is referred to these documents. In the design procedure, ceiling-to-floor elements are considered uniformly loaded. CLT panels and glulam beams are sized for two types of requirements: requirement related to the ultimate limit state where bending and shear resistance are taken into account, and requirements related to the serviceability limit states, where maximum allowable deflection are verified. Elements are sized according to major strength direction.

The overall structural calculation strategy is summarized in right-hand side of Figure 3.3. As floor elements, CLT panels are exposed to gravity loads (dead and live loads). Their flatwise bending moment resistance and shear resistance must be greater than bending moment and shear force respectively. CLT panels deflection should also be calculated and must not exceed the maximum allowable span. These three constraints are used to determine the maximal possible span of the CLT panels. In addition, the beams are also subjected to constraints on the bending moment, shear resistance and deflection. The equations introduced below are used to verify this set of constraints.

### 3.2.1.1. CLT bending moment resistance

More specifically, the flatwise bending moment resistance of the CLT panels,  $M_{rp}$ , can be obtained from:

$$M_{rp} = \phi F_b K_{rb} S_{eff} \quad (3.1)$$

where  $f$  is the CLT panel bending resistance factor and  $K_{rb}$  is the coefficient of strength modification, which are respectively equal to 0.9 and 0.85.  $F_b$  is the factored bending strength obtained from:

$$F_b = f_b K_D K_H K_{sb} K_T \quad (3.2)$$

where  $f_b$  is the specified bending strength in the longitudinal layers,  $K_D$ , the coefficient of load duration,  $K_H$ , the system factor,  $K_{sb}$ , the coefficient of operating condition for bending,  $K_T$ , the treatment coefficient.  $S_{eff}$ , which appears in Eq. (3.1), is the effective flat section modulus of CLT panels:

$$S_{eff} = \frac{EI_{eff}}{E} \frac{2}{h} \quad (3.3)$$

where  $E$  is the modulus of elasticity of the longitudinal layers,  $h$ , the thickness of the CLT panel, and  $EI_{eff}$ , is the effective flatwise bending stiffness of the CLT panel, which depends on the modulus of elasticity of the  $n^{\text{th}}$  layer  $E_n$ , the width of the panel for the major strength axis  $b$ , the thickness of the  $n^{\text{th}}$  layer  $H_{dn}$  and the distance between the center point of the layer number  $n^{\text{th}}$  and the neutral axis  $Z_n$  (see [123]). Note that  $N_p$  is the number of layers in the panel.

$$EI_{eff} = \sum_{n=1}^{N_p} E_n b H_{dn}^3 + \sum_{n=1}^{N_p} E_n b H_{dn} z_n^2 \quad (3.4)$$

The minimum value that the flat bending resistance of the CLT panels can reach is expressed as:

$$M_{fp} = \frac{1}{8} w_f L_p^2 \quad (3.5)$$



where  $L_p$  is the length of the CLT floor panel and  $w_f$ , the distributed load, which depends on the specified dead load,  $D$ , the specified live load,  $L$  and the CLT panel tributary width  $L_t$  :

$$w_f = 1.25DL_t + 1.5LL_t \quad (3.6)$$

From Eq. (3.1) to Eq. (3.5), the maximum span of the CLT panel  $L_p$  can be obtained by:

$$L_p = \sqrt{\frac{8\phi F_b K_{rb} S_{eff}}{w_f}} \quad (3.7)$$

### 3.2.1.2. CLT shear resistance

To calculate the flat shear resistance of the CLT panel, the shear resistance coefficient  $\phi$ , takes the value of 0.9, the shear resistance coefficient  $F_s$  and the CLT cross-sectional area  $A_g$  are determined and inserted as follows:

$$V_{rp} = \phi F_s \frac{2}{3} A_g \quad (3.8)$$

where:

$$F_s = f_s K_D K_H K_{SV} K_T \quad (3.9)$$

$$A_g = hb \quad (3.10)$$

As can be seen,  $F_s$  depends on the specified rolling shear strength of the CLT layer  $f_s$ , and on structural design coefficients defined previously.

The shear resistance value of the CLT panels ( $V_{rp}$ ) must be greater than the shear force:

$$V_{fp} = \frac{1}{2} w_f L_p \quad (3.11)$$

where  $w_f$  is the factored load defined previously and  $L_p$  is the length of the CLT panel.

From Eqs. (3.8)- (3.11), the maximum span of the CLT panel  $L_p$  can be obtained as :

$$L_p = 2 \frac{\phi F_s \frac{2}{3} A_g}{w_f} \quad (3.12)$$

### 3.2.1.3. CLT deflection

The deflection of the CLT panel in case of dead, live and total loads can be obtained respectively as:

$$\Delta_{pd} = \frac{5DL_p^4}{384EI_{eff}} + \frac{DL_p^2 K}{8GA_{eff}} \quad (3.13)$$

$$\Delta_{pl} = \frac{5LL_p^4}{384EI_{eff}} + \frac{LL_p^2 K}{8GA_{eff}} \quad (3.14)$$

$$\Delta_{ptotal} = \Delta_{pl} + \Delta_{pd} K_{creep} \quad (3.15)$$

where  $L_p$  the CLT panel length,  $L$  and  $D$  the distributed live and dead loads,  $E_{eff}$ , the effective bending stiffness of the panels defined in the previous section,  $K$  is the shear form coefficient,  $K_{creep}$  is the creep coefficient and  $GA_{eff}$ , the effective flat shear stiffness given by:

$$GA_{eff} = \frac{\left( h - \frac{H_{d1}}{2} - \frac{H_{dn}}{2} \right)^2}{\left( \frac{H_{d1}}{2G_1 b} \right) + \sum_{n=2}^{N_p-1} \frac{H_{dn}}{G_n b} + \left( \frac{H_{dN_p}}{2G_{N_p} b} \right)} \quad (3.16)$$

where  $b$  is the width of the panel,  $N_p$ , is the number of layers in the panel. The  $n^{\text{th}}$  layer thickness and the total panel thickness are noted respectively  $H_{dn}$  and  $h$ . the shear modulus of laminations in the  $n^{\text{th}}$  layer is  $G_n$ .

The maximum allowable deflection that  $\Delta_p$  can reach facing dead and live loads is given respectively by Eqs. (3.17) and (3.18).

$$\Delta_{pd,lim} = \frac{L_p}{360} \quad (3.17)$$

$$\Delta_{pl,lim} = \frac{L_p}{240} \quad (3.18)$$

The maximum allowable deflection that  $\Delta_{ptotal}$  can reach is given by Eq. (3.19).

$$\Delta_{ptotal,lim} = \frac{L_p}{180} \quad (3.19)$$

With Eqs. (3.13) to (3.19), the maximum allowable value of the CLT panel deflection can be expressed as:

$$L_p = \min \left\{ 360\Delta_{pd,lim}, 240\Delta_{pl,lim}, 180\Delta_{ptotal,lim} \right\} \quad (3.20)$$

#### 3.2.1.4. CLT maximal span

Based on Eqs. (3.1) to (3.20), the maximum allowable span of the CLT panels can be computed as the minimum value reached by  $L_p$  in Eqs. (3.7), (3.12) and (3.20), which will be the maximum allowable distance between

glulam beams. Glulam beams themselves will then be designed by determining their dimensions which are also subject to bending moment resistance, shear resistance and deflection. The following calculation steps are used in the design procedure of the beams.

### 3.2.1.5. Beam bending moment resistance

The beam bending moment resistance is first calculated. It is defined as the minimum value between  $M_r K_{zbg}$  and  $M_r K_L$ :

$$M_{rb} = \min\{M_r \cdot K_{zbg}, M_r \cdot K_L\} \quad (3.21)$$

where  $M_r$ ,  $K_{zbg}$ , (size factor in bending) and  $K_L$  (lateral-stability coefficient) are calculated as follows:

$$M_r = \phi F_b S \quad (3.22)$$

$$K_{zbg} = \left(\frac{130}{L_p}\right)^{\frac{1}{10}} \left(\frac{610}{H_p}\right)^{\frac{1}{10}} \left(\frac{9100}{L}\right)^{\frac{1}{10}} \quad (3.23)$$

$$K_L = \begin{cases} 1 & C_B \leq 10 \\ 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{C_B}{C_K}\right)^4 & 10 \leq C_B \leq C_K \\ \frac{0.65EK_{SE}K_T}{C_B^2 F_b K_X} & C_K \leq C_B \leq 50 \end{cases} \quad (3.24)$$

The parameters appearing in these equations are determined as follows.  $\phi$  is the resistance bending factor for the Glulam beam.  $F_b$  is the factored bending strength and S, the static moment of the beam respectively calculated as follows:

$$F_b = f_b K_D K_H K_{Sb} K_T \quad (3.25)$$

$$S = \frac{L_p H_p^2}{6} \quad (3.26)$$

Moreover,  $L_p$  is the width of the beam,  $H_p$ , its height and L, its length, E is the specified modulus of elasticity.  $K_X$  is the curvature factor which is equal to 1 for straight members.  $C_B$  (the slenderness ratio which depend on the beam effective length  $L_e$ ) and  $C_K$  are calculated according to:

$$C_B = \sqrt{\frac{L_e H_p}{L_p^2}} \quad (3.27)$$

$$C_k = \sqrt{\frac{0.97EK_{SE}K_T}{F_b}} \quad (3.28)$$

The beam bending resistance value must be greater than the beam bending moment:

$$M_{fb} = W_f \frac{L^2}{8} \quad (3.29)$$

where  $W_f$  is beam loading, calculated by:

$$W_f = 1.25DE_b + 1.5LE_b \quad (3.30)$$

In that equation,  $E_b$  is the distance between beams,  $D$ , the dead load and  $L$ , the live load.

### 3.2.1.6. Beam shear resistance

The beam shear resistance is also considered in the design procedure. For beams with volume  $Z$  less than 2 m<sup>3</sup>, the factored shear resistance can be calculated by:

$$V_{rb} = \phi F_v \frac{2}{3} A_n \quad (3.31)$$

where,  $\phi$  is the resistance factor equal to 0.9,  $A_n$  is the beam gross cross-section area ( $A_n = H_p L_p$ ),  $F_v$  is the factored resistance:

$$F_v = f_v K_D K_H K_{SV} K_T \quad (3.32)$$

In that equation,  $f_v$  is the specified strength in shear which is multiplied by a list of coefficients ( $K_D$  is the load duration factor,  $K_{SV}$  is the service condition factor,  $K_H$  is the system factor and  $K_T$  the treatment factor).

Finally, another constraint is that  $V_{rb}$  must not be less than the shear force  $V_{fb}$ , which is calculated by:

$$V_{fb} = \frac{W_f}{2} L \quad (3.33)$$

For beams with more than 2 m<sup>3</sup> in volume, the total shear resistance  $W_{rb}$  must not be less than the total factored loads which stress the beam  $W_f$ , which is calculated as follows:

$$W_{rb} = \phi F_v 0.48 A_n C_v Z^{-0.18} \quad (3.34)$$

where  $\phi$ ,  $F_v$ ,  $A_n$  and  $Z$  have been defined previously and  $C_v$  is the shear load coefficient.

### 3.2.1.7. Beam deflection

The design of the beam must take into consideration beam deflection:

$$\Delta_b = \frac{5w_f L^4}{384EI} \quad (3.35)$$

where  $L$  is the beam length,  $w_f$  is beam loading,  $E$  is the modulus of elasticity, and  $I$  is the moment of inertia. The maximum allowable deflection that  $\Delta_b$  can reach is:

$$\Delta_{b,\text{lim}} = \frac{L}{360} \quad (3.36)$$

All the above-mentioned equations ensure that the design of the ceiling-to-floor system respect structural requirements will be introduced as constraints in the multi-objective optimization algorithm presented below.

### 3.2.2 Modeling of air distribution system

The design of the air distribution ductwork is based on the following two steps: (i) the choice of the ductwork layout to deliver the specified airflow rates to the different zones and (ii) the sizing of the air distribution system components. In the present work, the layout was considered as an input to the model. Therefore, once the layout is known, the airflow rate  $Q$  in each duct section can be calculated and the ducts can be sized. The objective function on which this operation relies is the maximal pressure drop in the air distribution system (to be minimized):

$$\Delta P_{\text{max}} = \text{MAX}(\Delta P_j) \quad j = 1, J \quad (3.37)$$

where  $\Delta P_j$  is the total pressure drop along a path  $j$  from the intake on the floor level up to the diffusers, and  $J$  is the number of such paths in the layout. In order to calculate these total pressure drops  $\Delta P_j$ , the equivalent length of each pipe was calculated according to:

$$L_{\text{eq},i} = L_i + \frac{D_i}{f_i} \sum_{\text{fittings}} C \quad (3.38)$$

where  $L_i$  is the actual length of pipe  $i$ ,  $D_i$ , its diameter, and  $f_i$ , the friction coefficient which was determined according to:

$$f_i = \begin{cases} f_i' & \text{if } (0.018 \leq f_i') \\ 0.85f_i' + 0.0028 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.39)$$

$$f_i' = 0.11 \left( \frac{\varepsilon}{D_i} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0.25} \quad (3.40)$$

where  $\varepsilon$  is the absolute roughness factor and  $\text{Re}$  is the Reynolds number.

Note that the summation in the last term is over all fittings associated with pipe  $i$ , taking into account the resistance coefficient  $C$  of each fitting. Then, the total pressure drop along the path  $j$  is obtained by summing the pressure drop of each pipe along the path:

$$\Delta P_j = \sum_{i=1}^I f_i \frac{L_{eq,i} \rho V_i^2}{2D_i} \quad (3.41)$$

The velocity  $V_i$  in a duct  $i$  is related to the volumetric flow rate  $Q_i$  with the following relation:

$$V_i = \frac{4Q_i}{\pi D_i^2} \quad (3.42)$$

In the above equation,  $D_i$  is the diameter of the duct if a circular duct is used or the hydraulic diameter if a rectangular duct is used. In the present work, we always used ducts with a circular cross-section.

Finally, it is important to recall that the ductwork passes under the CLT panel: either in parallel to beams or perpendicularly to them, in which case, interference will appear. In that case, a hole will be necessary in the beam allowing the duct to cross it, and it is required to ensure that this does not jeopardize the beam structural capacity. According to a reference in the field [124], the diameter of the hole must be less than 15% of the beam height or less than 30 % of the height if the beam is reinforced. These requirements impose an additional constraint coupling the structural design and duct sizing:

$$D_x \leq CH_p \quad (3.43)$$

where  $D_x$  is the diameter of the duct number  $x$  that interferes with a beam having a height  $H_p$ . As mentioned above, the constant  $C$  is equal to 15% if the beam is not reinforced and 30% if the beam is reinforced.

### 3.2.3 Optimization problem

As introduced above, Figure 3.3 summarizes the proposed framework in the form of a workflow diagram. In brief, starting with a set of fixed input data (ventilation layout, structural loads, and design variable space), the optimization algorithm iteratively generates a series of possible CTFS designs, evaluates the objective function values of each design and ensures that the different constraints be respected. Once convergence is achieved, a family of optimal designs is obtained. The different steps of the optimization procedure are described in detail in the following subsections.

### 3.2.3.1. Formulation of the optimization problem

Formally, the optimization problem solved in the present work can be defined as follows:

$$\begin{aligned}
 & \min \begin{cases} H_{tot} \\ \Delta P_{max} \end{cases} \\
 & \text{varying: } H_C, N_p, H_{dl}, H_{dt}, T, L_p, H_p, E_b, D_1, \dots, D_n \\
 & \text{such that } \begin{cases} E_b \leq E_{max} \\ V_{fb} \leq V_{rb} \\ M_{fb} \leq M_{rb} \\ \Delta_b \leq \Delta_{b,lim} \\ D_x \leq CH_p ; C = \begin{cases} 15 \% \text{ if the beam is not reinforced} \\ 30 \% \text{ if the beam is reinforced} \end{cases} \end{cases} \quad (3.44)
 \end{aligned}$$

As can be seen, the two objective functions to be minimized are (i) the thickness of the ceiling-to-floor sandwich, and (ii) the pressure drop in the air distribution network.

The first objective (total thickness of the ceiling-to-floor assembly) is calculated with:

$$H_{tot} = H_C + H_D + H_P + PF_b + PF_p \quad (3.45)$$

where  $H_C$ ,  $H_D$  and  $H_P$  are respectively the thickness of the concrete screed, the CLT panels and the glulam beam.  $PF$  is penalty added to the objective function when structural constraints are not respected. The calculation of  $PF$  is presented below.

As for the second objective,  $\Delta P_{max}$ , it is determined from Eq. (3.37).

The first 8 design variables are related to the structural parameters: concrete screed thickness ( $H_C$ ), CLT panels number ( $N_p$ ), CLT longitudinal panel thickness ( $H_{dl}$ ), CLT transversal panel thickness ( $H_{dt}$ ), beams dimensions ( $L_p$ ,  $H_p$ ), timber type ( $T$ ) and distance between beams ( $E_b$ ). The remaining design variables are the diameter of each duct section. The design variables are presented in Table 1, along with their range of possible values in the present study. In a given case, the number of design variables is thus equal to the number of duct sections plus 8.

The optimization problem involves a series of constraints. First, each design variable value was constrained based on the information contained in Table 3.1. Second, from the structural model, two verifications related to ultimate limit state of the CLT panels and glulam beams were made: the allowable limit of the bending and shear resistance were checked. Regarding the serviceability states, the verification of the maximum allowable deflection for both CLT panels and glulam beams was carried out, as explained above. These constraints were

enforced by adding a penalty PF to the thickness objective function when they were not respected. The penalty is calculated by:

$$\begin{aligned}
 PF = & 10 \max(0, E_b - E_{\max}) + 10 \max(0, V_{fb} - V_{rb}) + 10 \max(M_{fb} - M_{rb}) \\
 & + 100 \max(0, \Delta_b - \Delta_{b,\text{lim}}) + 100 \max(0, \Delta_{pd} - \Delta_{pd,\text{lim}}) + 100 \max(0, \Delta_{pl} - \Delta_{pl,\text{lim}}) \\
 & + 100 \max(0, \Delta_{ptotal} - \Delta_{ptotal,\text{lim}})
 \end{aligned} \quad (3.46)$$

Note that each term is composed of a weight factor that multiplies either 0 (when the constraint is respected) or the value of the constraint violation. The weight factors were carefully chosen depending on the value of the constraint compared to the objective function. Their values were adjusted so that the constraints were all respected in the final solutions.

For the duct design system, it is a common practice to limit airflow velocity in order to avoid noise and vibration, i.e.:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (3.47)$$

Since the flow rate in each duct,  $Q_i$ , is known, fixing a range of possible values for  $V_i$  is equivalent to defining an interval of values for  $D_i$  (see Section 3.2.2). In the present work, the velocity constraints were thus used to define the range of minimal and maximal allowable diameter of each duct of the layout.

Note that the right-hand side of Fig. 3 illustrates in detail how, for a given set of the design variables (i.e., for one possible solution), the objective functions are calculated. First, all the constraints invoked above should be verified. Whenever a constraint is not respected, a penalty is calculated. Then, the two objective functions can be obtained at the bottom of the figure (pressure drop and thickness), including the penalty when applicable. Since penalties increase the value of the objective functions and since the algorithm presented below minimizes the value of these objective functions, the algorithm naturally tends to eliminate all solutions that violate constraints.

Table 3.1. List of design variable and their bounds.

Design variable	Range of values
Thickness of concrete screed, $H_c$	100 mm < $H_c$ < 400 mm
Number of CLT panels, $N_p$	$N_p = \{3, 5, 7, 9\}$
Thickness of longitudinal CLT panel, $H_{dl}$	10 mm < $H_{dl}$ < 80 mm
Thickness of transversal CLT panel, $H_{dt}$	10 mm < $H_{dt}$ < 80 mm



Height of beam, $H_p$	$100 \text{ mm} < H_p < 2000 \text{ mm}$
Width of beam, $L_p$	$100 \text{ mm} < L_p < 500 \text{ mm}$
Distance between beams, $E_b$	$1000 \text{ mm} < E_b < 3000 \text{ mm}$
CLT panels characteristics (see Table 2)	$T = \{1,2,3,4,5\}$
Diameter of section $i$ , $D_i$	$D_{\min} < D_i < D_{\max}$

Table 3.2. Properties of CLT panels: strength and modulus of elasticity of CLT grads (variable T: Timber type)  
[adapted from [122]]

CLT panels type		1	2	3	4	5
Longitudinal layers	CLT layups	Spruce-pine-fir MSR Lumber	Douglas fir-Larch MSR Lumber	Northern species	No.2 Spruce-pine-fir lumber	No.2 Southern pine lumber
	fb, MPa	28.2	23.9	17.4	10	11.8
	fs, MPa	0.5	0.63	0.43	0.63	0.5
	E, MPa	11700	10300	8300	11000	9500
Transversals layers	CLT layups	No.3 Spruce-Pine fir lumber	No.3 Douglas fir larch lumber	No.3 Eastern softwoods	No.3 Spruce-pine-fir lumber	No.3 Southern pine lumber
	fb, MPa	7	4.6	4.5	4.6	7
	fs, MPa	0.5	0.63	0.43	0.63	0.5
	E, MPa	9000	10000	6500	10000	9000

### 3.2.3.2. Optimization algorithm

We chose the NSGA-II (nondominated sorting genetic algorithm) to solve the multi-objective optimization problem formulated above. This corresponds to the left side of Fig. 3.3 NSGA-II is one of the most popular multiobjective evolutionary algorithms for this type of problem. Since that algorithm is well documented in literature, only a brief summary is provided here. The algorithm starts by generating a random initial population of designs. The objective functions (i.e., pressure drops and thickness with high penalty when constraints are not respected) of each design are then evaluated based on the models introduced above (right-hand side of Fig. 3.3). Then, based on genetic operators (selection, crossover and mutation), fast nondominated sorting technique and crowding distance, the next generation population is created. The best individuals are selected according to their non dominance and diversity. Convergence is verified, for example by verifying whether the population has improved compared to that of the previous generation (the detailed convergence criteria presented in Section 3.2.3.3). As long as needed, the optimization process is repeated until a converged solution be obtained. The final output of the algorithm takes the form of a Pareto front of non-dominated solutions with respect to the two objective functions.

The efficiency of NSGA-II depends on its hyper-parameters such as the population size and generation number. In literature, there is no hard rule that specifies how to define these parameters, but there is an agreement that the most important are the number of generations and population size [125].

### 3.2.3.3. Metrics to analyze the performance of the optimization algorithm

The Pareto front represents the end result of the optimization through which tradeoffs between different objectives can be obtained [126]. The quality of a Pareto front can be analyzed through various aspects such as its diversity, number of solutions, cardinality and spread [127, 128]. In this work, we chose the generation distance (GD) and the inversed generation distance (IGD) to quantify the convergence, and the spacing metric (SP) to quantify the distribution of optimal solutions [129]. These indicators can help to determine the appropriate population size and number of generations over which to run the algorithm.

At a given generation, the GD indicator is:

$$GD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}{n} \quad (3.48)$$

where  $n$  represents the number of optimal solutions (i.e., Pareto front points number), and  $d_i$  is the Euclidean distance between a solution "i" in the non-dominated set at a given generation and the closest point in the true Pareto front. As the generations go by, the Pareto front gradually evolves towards the true Pareto front. As a result, the value of GD goes down and eventually tends to 0, indicating that the algorithm has converged [129].

The indicator IGD can be obtained from:

$$IGD = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{n_t} d_k^2}}{n_t} \quad (3.49)$$

where  $n_t$  represents the true Pareto front of optimal solutions, and  $d_k$  is the Euclidean distance between a point  $k$  in the true Pareto optimal solution and the closest point in the non-dominated set for every population. A smaller IGD value indicates a better convergence of the obtained solutions with respect to the true Pareto front [129].

Finally, the indicator SP is calculated with:

$$SP = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\bar{d} - d_j)^2} \quad (3.50)$$

where  $\bar{d}$  is the average of all  $d_j$ :

$$d_j = \min_s (|f_1^j(\vec{x}) - f_1^s(\vec{x})| + |f_2^j(\vec{x}) - f_2^s(\vec{x})|) \quad (3.51)$$

where  $j, s = 1, n$ . A low SP value indicates a good distribution of solutions along the Pareto front [129].

### 3.3. Case study description

To evaluate the performance of the modeling and optimization framework developed above, a case study was elaborated and is presented here. The structure configuration of the ceiling-to-floor assembly is inspired from a real commercial building presented in the Canadian CLT Handbook [122]. The floor dimensions are 15.2 m by 50 m. The configuration used is presented in Figure 3.3, illustrating both the structural and air distribution systems.

In the structural model introduced in Section 3, a load is needed as an input. For the present test case, the load [kN/m<sup>2</sup>] was calculated according to:

$$P = 1.25D_L + 1.5L_L \quad (3.52)$$

where  $D_L$  and  $L_L$  represent respectively the dead and the live load. The dead load is obtained by summing the contribution of the concrete slab, timber elements, and others loads. The concrete dead load is calculated by multiplying the thickness of the slab by its density:

$$D_c = H_c \rho_c \quad (3.53)$$

A density of 2300 kN/m<sup>2</sup> was used. The CLT panel dead load is calculated in the same way:

$$D_{clt} = H_d \rho_{clt} \quad (3.54)$$

The other dead loads were estimated at 1.45 kPa. Finally, an estimated live load value of 4.8 kPa was considered.

Beams and CLT panels are considered uniformly loaded. Beams material characteristics are taken as follows: traction coefficient  $f_s$  of 0.5 MPa, flexion coefficient of 28.2 MPa, module of elasticity of 11,700 MPa. The following design conditions assumption are considered: dry service condition, standard duration of load and untreated system.

For the air distribution system configuration, 26 duct sections are considered. Figure 3.3 shows the layout including duct section number and fittings. Each arrow represents a node for air diffusion. Red, grey, and blue arrow represent respectively a flow rate of 144 m<sup>3</sup>/h, 216 m<sup>3</sup>/h and 288 m<sup>3</sup>/h. The number (in red) and the length (in black) of each section can be seen in Figure 3.3. Each node represents an airflow rate which is calculated based on the number of persons per zone. The minimum velocity in each duct is taken as 3 m/s, and a maximum of 10 m/s was considered. Ducts 3, 4, 6, 8, 9, 13, 12,16,17, 19, 20, 22, 24, and 25 interfere with beams, so their cross-section diameters are limited by the structural constraint related to the aperture size introduced above.

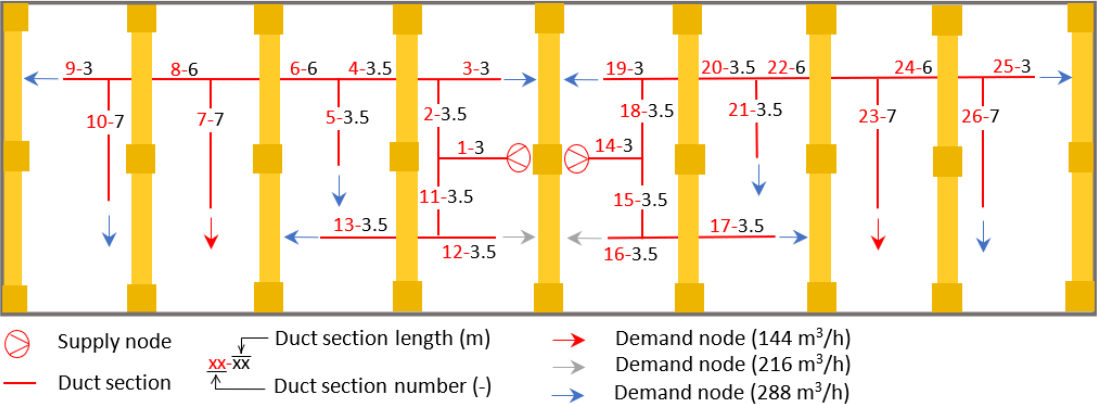


Figure 3.4. Schematic top-view representation of the structural (yellow) and air distribution systems (red) for the case study.

As will be detailed in the result section, this test case ceiling-to-floor assembly was optimized for three possible situations:

- (i) Unreinforced beams in which case holes in beams must be smaller than 15% of the beam height (i.e.,  $C$  in Eq. (45) is 15%);
- (ii) Reinforced beams in which case the holes in the beams must be smaller than 30% of the beam height (i.e.,  $C$  in Eq. (45) is 30%);
- (iii) No hole is allowed in beams so that ducts are positioned below the beams. In that case, the overall thickness of the assembly, which is one of the two objective functions introduced above, needs to be calculated by considering the maximum diameter of the air distribution sections:

$$H_{tot} = H_C + H_D + H_P + PF + Max(Di), \quad i = 1, \dots, n; \quad (3.55)$$

Finally, another duct layout will also be investigated in the result section to determine the impact of the layout on the results.

### 3.4. Results and discussion

#### 3.4.1 Convergence of optimization algorithm

Before presenting the key results, it is worth describing how the performance of the optimization approach was assessed based on the metrics introduced in Section 3.2.3.3. The convergence analysis presented in this section was performed for the first configuration of ceiling-to-floor assembly (structure with unreinforced beams).

Figure 3.4 shows the Pareto front evolution as a function of the number of generations. As seen in the figure, increasing the number of generations pushes the Pareto front towards the lower left corner, i.e. improves the objective function values of the solutions. However, one can notice that after ~1,000 generations, the solutions stop to evolve, i.e. Pareto fronts are superposed.

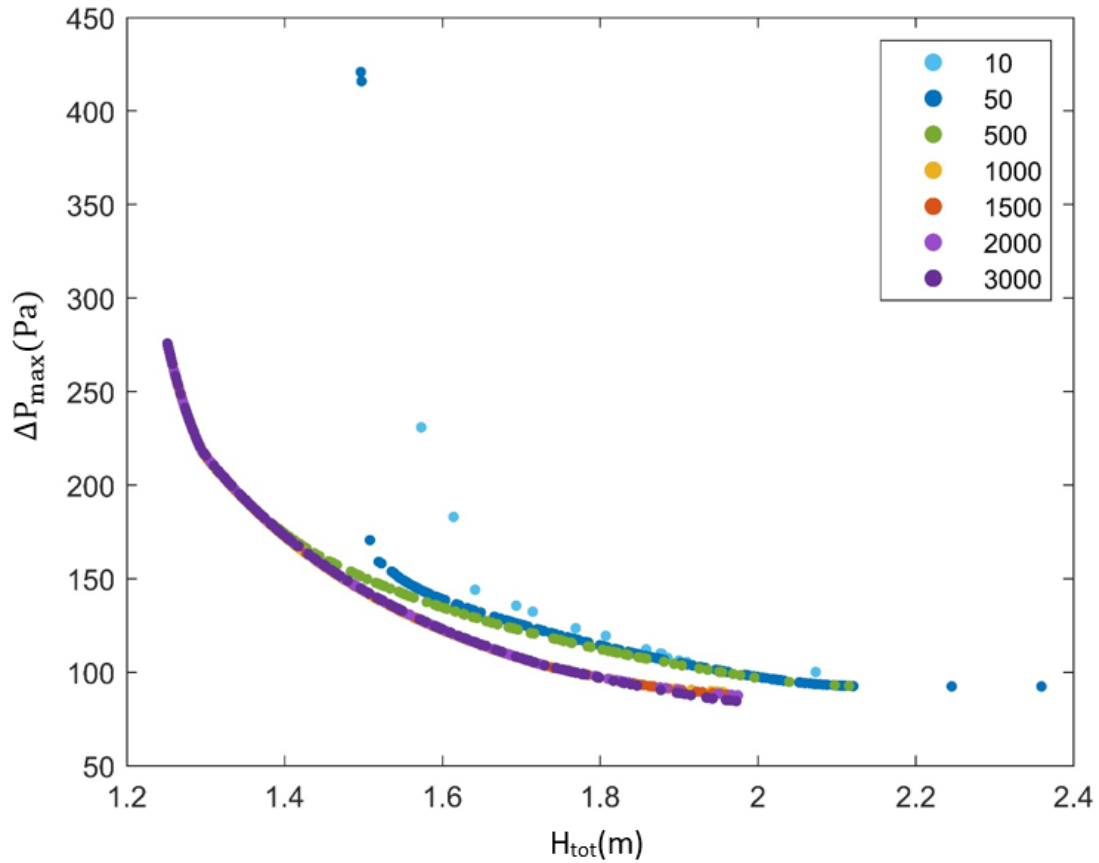


Figure 3.5. Evolution of the Pareto front over generations for the test case with unreinforced beams.

In Figure 3.6, the convergence of the algorithm has been studied through metrics (GD, IGD, and SP) introduced respectively in Eqs. (3.48), (3.49) and (3.50). The “true” Pareto front was defined as the ultimate Pareto front achieved after a large number of generations (in this case, 3000 generations). This reference front was used in the calculation of the generation distance and of the inversed generation distance. A logarithmic scale has been chosen to better follow metric value variation.

For IGD and GD, the closer the result is to 0, the better the solution is. During the first 140 generations, the value of IGD and GD drops quickly, but was not stable. As the number of generations continues to increase, both metric indicators reach a fairly low value which stabilizes after ~1250 generations.

The SP metric also decreases over generations, going through several peaks over generations and end up at a constant value very close to zero. Peaks indicate an imbalance in the distribution of the solutions on the Pareto front, the last one occurring around the 1,600<sup>th</sup> generation. It has been seen between the 1000 generations and 1,200 generations and between 1,600 and 1,700 generations.

The convergence analysis was performed for all configurations of ceiling-to-floor assembly described in Section 3.3 It was decided to run the algorithm over 2,000 generations in all the cases investigated in this study, as increasing this number further did not improve the solution.

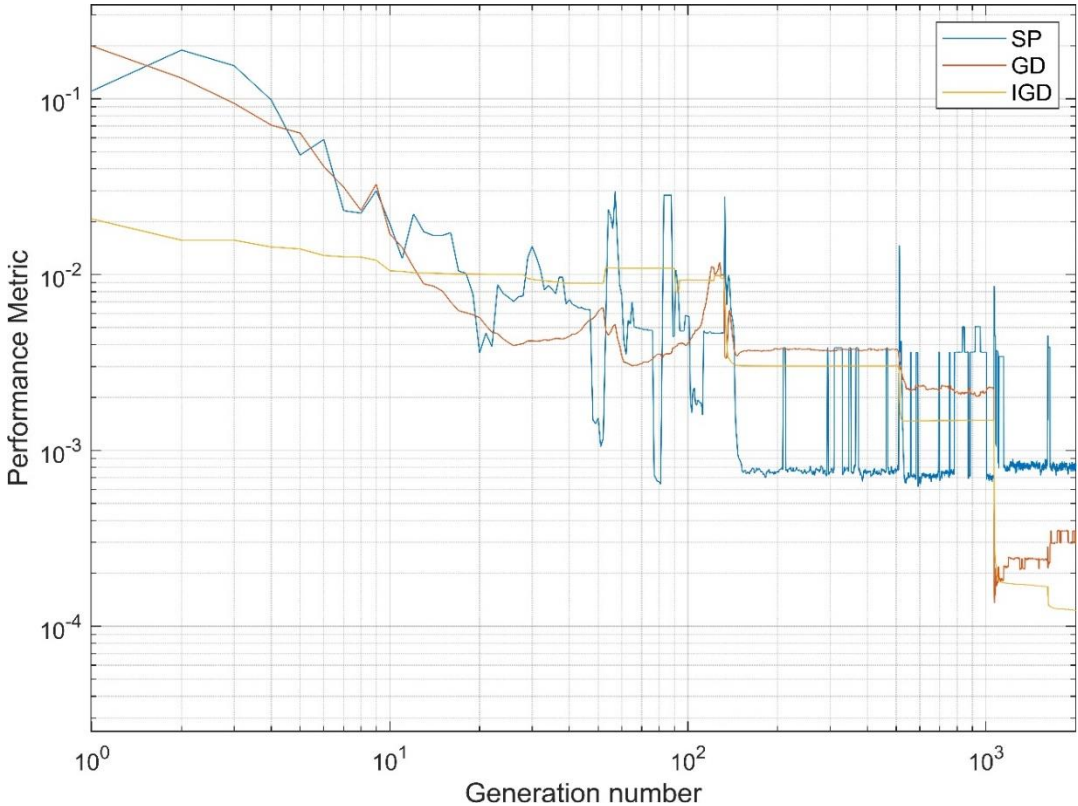


Figure 3.6. Logarithmic presentation of GD, IGD, and SP variation as function of generation.

### 3.4.2 Solutions analysis

#### 3.4.2.1. Pareto fronts for the three configurations

As mentioned in the description of the case study, the ceiling-to-floor assembly was optimized with the proposed framework for three possible configurations: with unreinforced beams, with reinforced beams and with the ducts below the beams. The resulting Pareto front for each of these three situations are reported in Fig. 3.7. Each point in the figure represents a particular solution obtained by the algorithm. The designer can select any of these solutions depending on how they weigh each objective in a particular situation (i.e. height vs pressure drop). Note that in order to make the figure more legible, only 1 point out of 5 is shown.

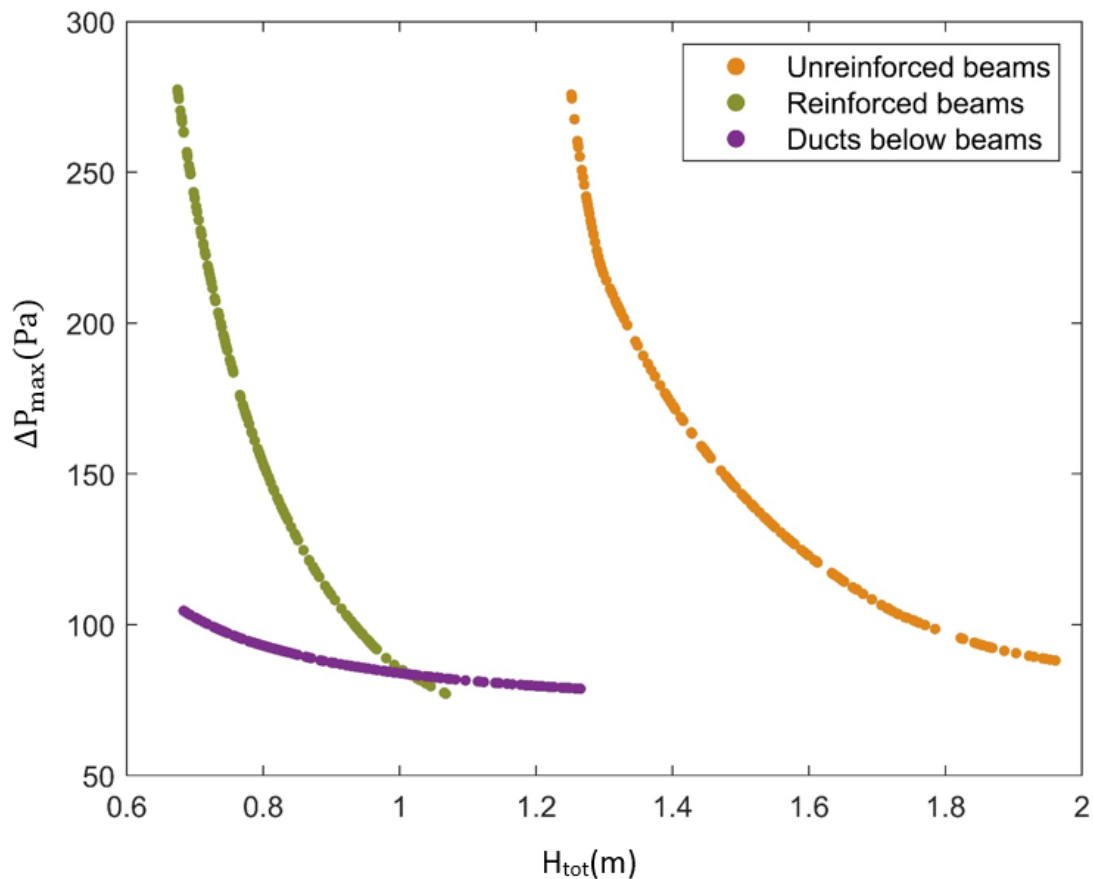


Figure 3.7. Comparison of Pareto fronts for three possible configurations: unreinforced beams (green), reinforced beam (orange), and ducts positioned below beams (purple).

As expected, designs achieving a low pressure drop involve thick ceiling to flow assemblies, and vice versa, demonstrating clearly that the two objectives selected are conflicting in nature. One can observe that the minimized pressure drop varies approximately between 75 Pa and 300 Pa depending on the solutions. This pressure drop range is similar in configurations with unreinforced and reinforced beams once they are optimized

but this range is significantly lower in the configuration where ducts pass under beams. As for the assembly thickness, it varies approximately from 0.65 m to 2 m. Solutions with reinforced beams always lead to much thinner assembly than those with unreinforced beams, since the beam height in the presence of a hole can be smaller without impacting the structural integrity of the system. Surprisingly though, we found that the configuration in which ducts are positioned below the structure typically allowed to reduce the thickness further, as that third Pareto front appears on the left-hand side of the figure. This indicates that for achieving thinner assemblies with the use of apertures in beams, the constant  $C$  in Eq. (3.45) would need to be higher, i.e. larger holes would need to be tolerated.

It should be mentioned that there is no similar study in literature that presents optimized ceiling-to-floor systems considering at the same time ventilation ducts and the structure, which makes a direct comparison quite difficult. However, some examples of CTFS details were found in grey literature to offer a certain comparison with the present results. First, the Canadian CLT handbook [123] provides an example of the composition of a CTFS similar to that under study here including a 150 mm concrete slab, a 175 mm CLT panel and glulam beam of 175 mm x 570 mm. This yields a thickness of 895 mm. Similarly, the center of expertise on wood construction CECOBOIS [130] also provides an example of a similar composition, with 38 mm of concrete, 175 mm of CLT panel, and glulam beam of 279 mm by 502 mm, yielding a thickness of 715 mm. These two examples were designed to respect codes and standards without considering ductwork. Now, the duct with the maximal flow rate has a flow rate of 1,800 m<sup>3</sup>/h in our case. The rule of thumb in duct sizing suggests to aim for a pressure drop between 0.65 – 5 Pa/m [131]. This points towards a duct diameter between 400 and 630 mm [132]. In traditional construction, the duct would be below the beams, and the total thickness would be the summation of the structural components thickness and the duct diameter. Considering the above-mentioned values, these typical CTFS thickness would be in the range 1155-1525 mm. Looking at the Pareto front and optimal designs obtained in the paper (Figs. 3.7 and 3.8), it can be seen that thinner CTFS can be obtained either in cases with ducts through reinforced beams or with optimized configurations with ducts below beams, showing the relevance of the proposed approach.

Finally, the extremes of the Pareto fronts can reveal the benefits of optimizing simultaneously the two objectives functions. Looking at Figure 3.7, the thinnest possible CTFS that has been obtained has a thickness of ~0.7 m. This thickness was obtained both for the reinforced beam case and to the configuration with the ducts below the beam. It corresponds to a situation in which the worst ductwork pressure loss is reached; in other words, it could be seen as best thickness possible when disregarding ductwork (i.e. as is usually done) and this results in a high pressure loss. Similarly, the smallest pressure drop (~75 Pa) can be seen at the value that could be obtained when disregarding compactness considerations, and this would yield to very thick CTFS. In the end, the proposed approach allows to generate a family of optimal solutions offering different trade-offs between the objectives depending on the designer's preference.



### 3.4.2.2. Optimal solutions with unreinforced beams

Next, we analyze in detail the solutions that were obtained for each configuration, i.e. the different points on the Pareto fronts. Parallel coordinate plots can be used to better understand the relation between the optimized design variables and the objective functions. Every line in such figures represents a solution, i.e. a combination of design variables leading to minimized objective function values.

Figures 3.8 and 3.9 presents the optimal designs from the Pareto front with unreinforced beams. Again, in order to improve their legibility, only 1 out of 5 solutions are reported in the figures. The lines have been colored according to the pressure drop: low pressure drop ( $< 150$  Pa), medium pressure drop (150 Pa - 200Pa) and height pressure drop ( $> 200$  Pa). This also corresponded respectively to three ranges of assembly thickness, namely high thickness ( $>1.47$  m), medium thickness (1.35-1.47 m) and low thickness (1.25-1.35 m). Figure 3.8 focuses on the structural design variables. First, it is worth noting that for a few variables, the optimization almost always returns the same value. That is the case for example with the number of panels which is always 3. For the other variables, however, a greater range of values was present among the solutions. In general, it was found that the thickness of the transverse and longitudinal are similar ( $H_{dt} \sim H_{dl}$ ) in a given solution, but that this value varies between solutions. Solutions with a thick CLT (high  $H_{dl}$  and  $H_{dt}$ ) slab had beams which are not widely spaced (high  $E_b$ ) and high (high  $H_p$ , low  $L_p$ ), yielding a thick ceiling-to-floor assembly. On the other hand, other solutions produced thinner assemblies, when the CLT and concrete slabs are thinner, with closely spaced stubbier beams. It can be noted from Fig. 3.8 that most of the assembly thickness is contributed by the beam height in all solutions, representing between 88 and 93% of the total ceiling-to-floor thickness, depending on the design. Finally, Fig. 3.8 also shows the minimized pressure drop of each design, allowing to observe that the pressure drop (and thus the fan energy consumption) is typically smaller in thicker ceiling-to-floor sandwiches since they can accommodate larger ducts.

To better illustrate that, we report in Figure 3.9 the optimized design variables related to the ventilation ducts (i.e., duct diameter) for the same solutions as those of Fig. 3.8. For the sake of clarity and due to the symmetry of the air distribution system, only a half of the diameter values of the ducts crossing beams are shown in the figure. We observed that there is always one of the ducts crossing beams for which the constraint of Eq. (3.43) about the maximal possible size of the aperture in the beam is active, and it is the duct with the largest flow rate (i.e.,  $D_4$ ).

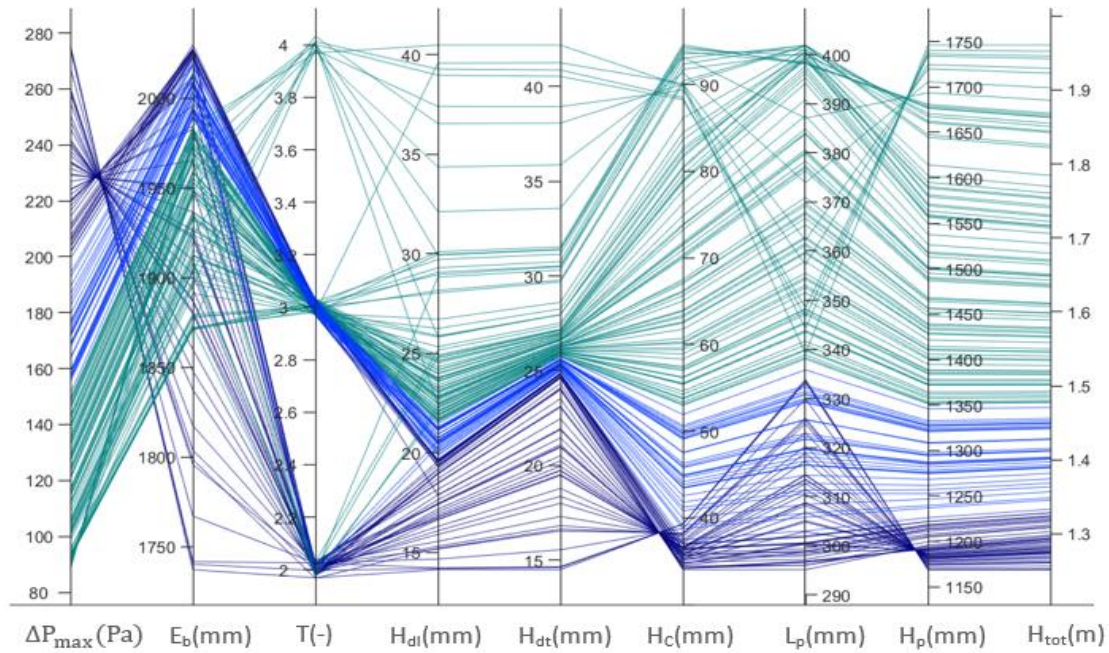


Figure 3.8. Parallel coordinate plot of the optimal design variables related to the structure with unreinforced beams.

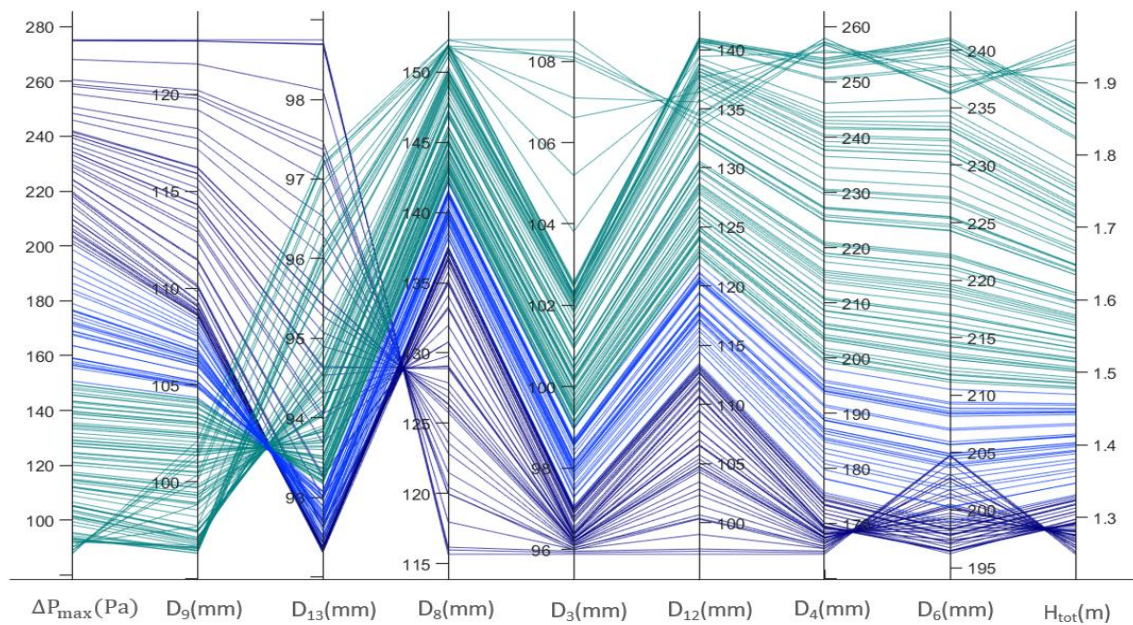


Figure 3.9. Parallel coordinate plot of the optimized design variables related to the ducts with unreinforced beams.

### 3.4.2.3. Optimal solutions with reinforced beam

As previously mentioned, the optimization method was also tested with reinforced beams. In that case, the diameter of apertures allowing ducts to pass can reach up to 30% of the beams height instead of 15% [124]. Optimal solutions are reported in Figures 3.10 and 3.11 in the form of parallel coordinate plots for the structural and ductwork aspects, respectively.

As seen in Figure 3.10, the total thickness of the ceiling-to-floor assemblies with reinforced beams ranges from 0.65 to 1.1 m, which is smaller than previously, with non-reinforced beams. This is due to the fact that, for a given duct diameter, reinforced beam can be thinner. Fig. 3.10 shows that smaller values of  $H_p$  than previously are now possible, i.e. 575-920 mm compared to 1150-1800 mm for non-reinforced beams.

As for the optimized duct diameters shown in Fig. 3.10, the duct section (D4) with the largest flow rate continues to control the thickness of beams. Compared to the previous configuration, its diameter is larger. However, due to the fact that most duct diameters are very similar compared to the previous configuration, the pressure drop range (80-280 Pa) is also the close to that of the previous configuration.

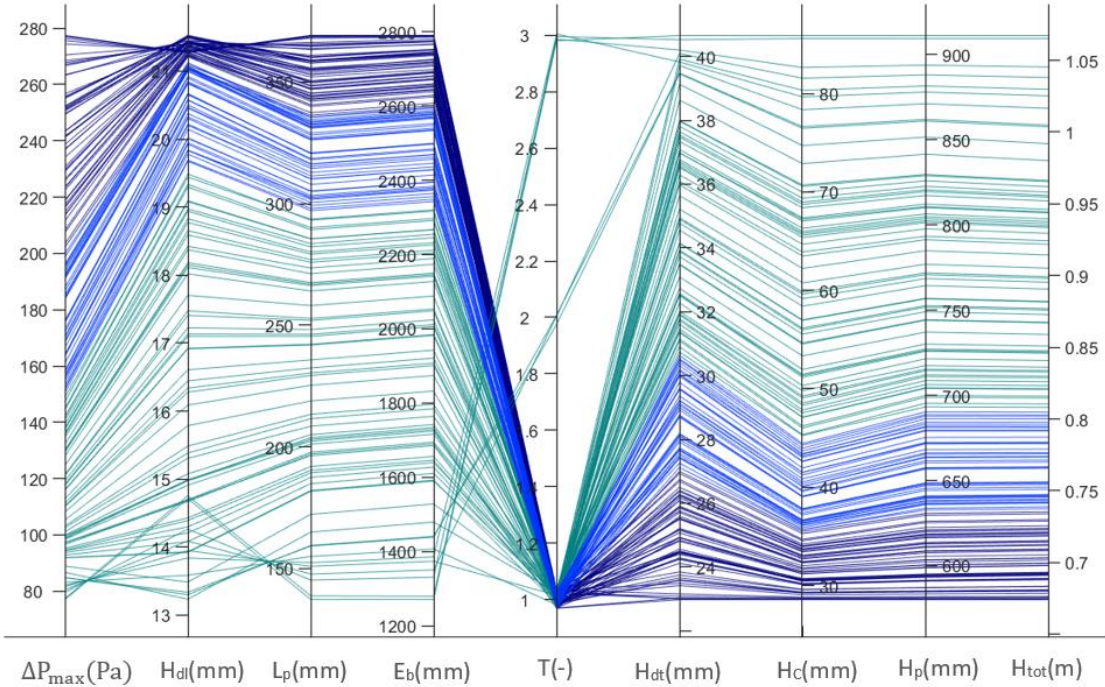


Figure 3.10. Parallel coordinate plot of the optimal design variables related to the structure for the configuration with reinforced beams.



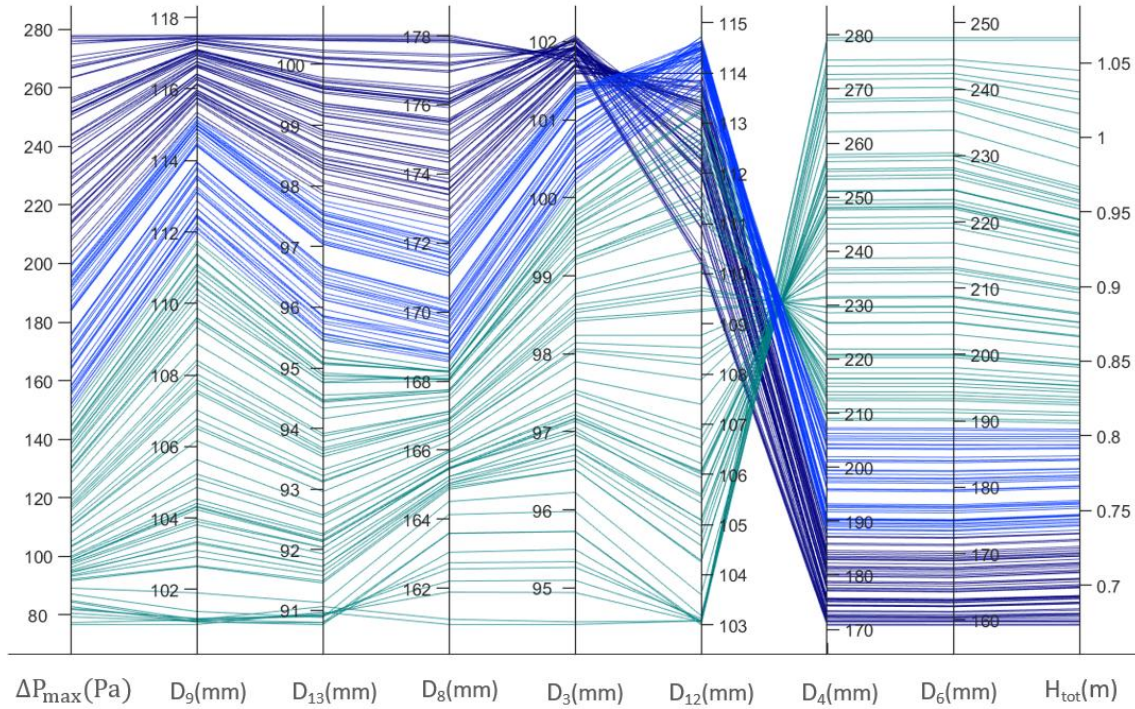


Figure 3.11. Parallel coordinate plot of the optimized design variables related to the ducts for the configuration with reinforced beams.

### 3.4.2.4. Optimal solutions with ducts under beams

Finally, this section describes the optimal solutions obtained when ducts were positioned under beams. In other words, in that configuration, no hole was needed in the beam to accommodate ducts. In Fig. 3.12, the optimal solutions for that configuration are presented in a parallel coordinate diagram. As the pressure drops range from 50 Pa to 105 Pa, we adjusted the color scale for better visibility compared to previous figures: pressure drops lower than 80 Pa are shown with green lines, pressure drops in the range from 85 Pa to 95 Pa with blue lines, and pressure drops greater than 95 Pa with indigo lines. This also corresponded respectively to three ranges of assembly thickness, namely high thickness (>0.95 m), medium thickness (0.77-0.94 m) and low thickness (0.69 – 0.78m).

Analyzing the structure related design variables, it is observed that in some solutions of the 3rd configuration, the beam width is equal or very close to the beam height ( $L_p \cong H_p$  or  $L_p \leq 51\%H_p$ ). In the present test case, this influenced positively the assembly thickness which ranges from 0.65 to 0.87 m.

Comparing results obtained in this third configuration (i.e., ducts under beams) with those for the reinforced beam with holes, one can see that some solutions provide nearly identical objectives function values, but with different sets of design variables. For example, we can find solutions having an assembly thickness  $H_{tot}$  of 1.037

m and a pressure drop of 80.63 Pa in both configurations. The most striking difference between the two solutions is beam dimensions. When the ducts have to pass through beams, high beam cross-sectional dimensions (880 by 134 mm) are needed than when they pass below beams (518 by 190 mm).

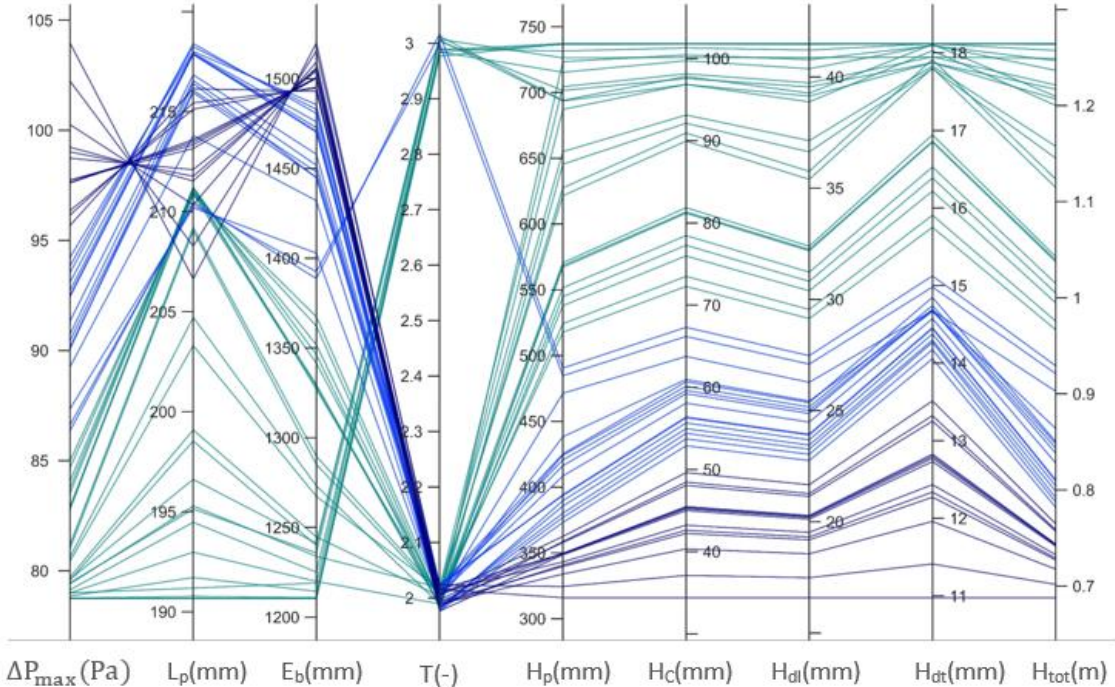


Figure 3.12. Parallel coordinate plot of the optimal design variables related to the structure for the configuration with ducts below beams.

**4.2.5. Impact of duct layout**

For the same case study, another duct layout has been tested in order to evaluate its potential impact on the solutions. The same objective functions have been minimized and formulas presented previously have been used. Only the flow rates and layout have been changed. As illustrated in Figure 3.13, 28 duct sections are considered. Ducts 1, 3, 5, 10, 12, 14, 15, 17, 19, 24, 26, 28 interfere with beams, so they must respect structural constraints introduced previously. Each blue arrow represents a node for air diffusion with a flow rate of 144 m<sup>3</sup>/h.

The Pareto front illustrating the optimal solution with unreinforced beams is reported in Figure 3.14, along with the front that had been achieved with the previous duct layout. It can be seen that both objectives are affected by the layout. In particular, the thickness of the assembly was significantly reduced with the new layout. The pressure drop was also reduced, but to a lesser extent. Given that the duct layout can impact both objectives, it would be interesting to expand the present optimization framework to eventually optimize the duct layout as well.

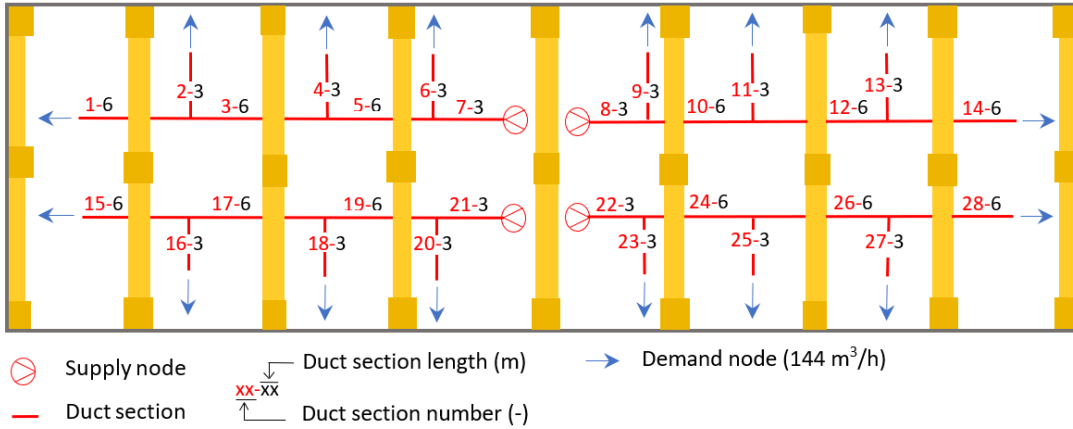


Figure 3.13. Schematic top-view representation of the structural (yellow) and air distribution (red) systems of the second layout tested in this work.

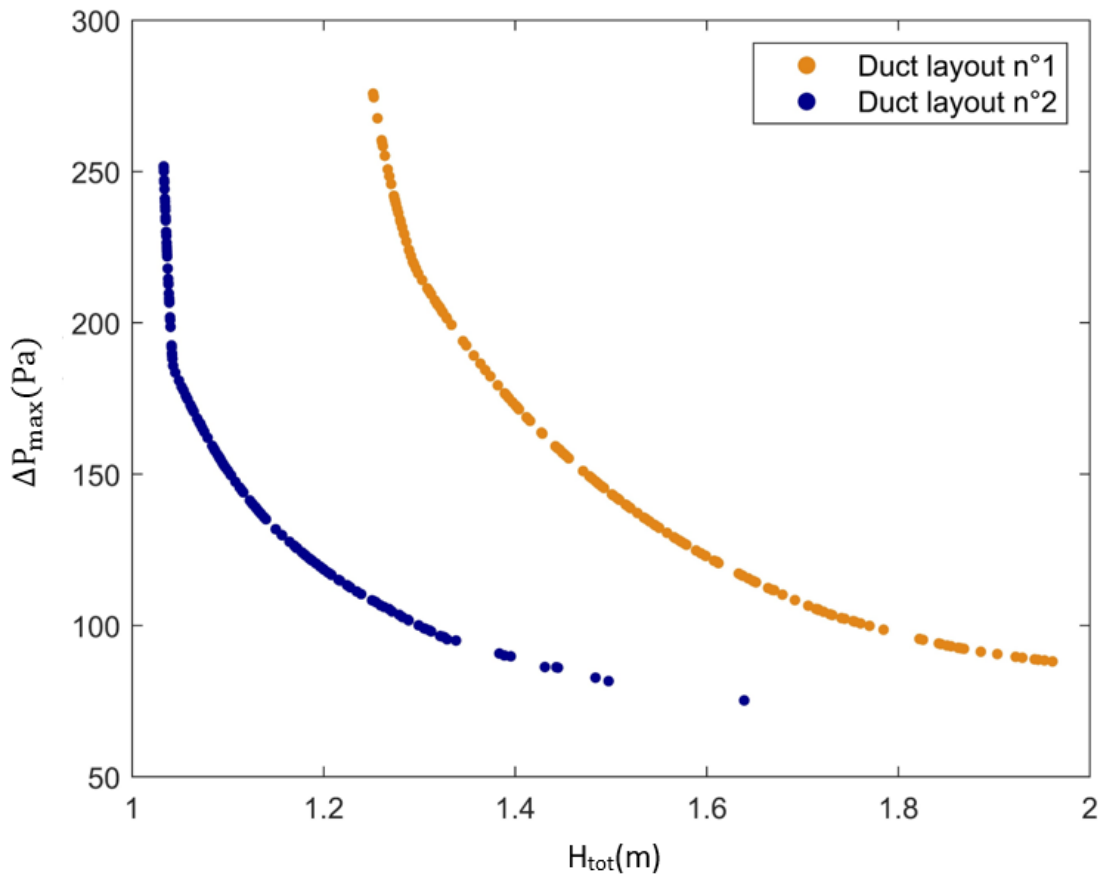


Figure 3.14. Pareto front for two different duct layouts (from Fig. 3.4 in orange and from Fig. 3.13 in blue with unreinforced beams).

### **3.5 Conclusions**

The design of ceiling-to-floor systems involves different disciplines, with different priorities and constraints. This paper introduces a new method for designing ceiling-to-floor assemblies through a multi-objective optimization approach. More specifically, the method aims to minimize both thickness and pressure drop. The design method allows to find the best coordination between ceiling-to-floor elements and ensures the respect of a series of design rules. One of the novelties of this method is that it includes both structural and building service systems optimization objectives. The optimization framework was used to compare three configurations and compare different ductwork disposition. First, we considered a situation in which ducts could pass through the beams, with a structural constraint ensuring that the diameter of the hole be smaller than 15% of the beam height. In the second situation, we considered openings in beams with reinforcement, which allowed to tolerate openings up to 30% of the beam height. Finally, we considered a configuration with no holes and therefore the ducts must pass under the beams. A series of Pareto fronts has been obtained and designers can select among different solutions depending on their priority (compactness vs energy consumption) in a given project. For the test case, the range of the pressure drop was similar for configurations where ducts pass through beams but smaller in the traditional configuration. Regarding thickness, best results are also obtained from the third configuration. This seems to indicate that more tolerance to holes would be needed in order to truly benefit from apertures in the beam to increase the compactness of the ceiling-to-floor sandwich. Finally, we demonstrated that the optimal compactness is also intricately related to the duct layout.

The proposed design methodology can be improved in different ways. First, the models that it includes could be refined. For example, the maximal allowable percentage of aperture were based on recommendations from manufacturers and codes, but could eventually be calculated through modeling (e.g., finite element model). This could potentially determine more precisely the tolerance for holes in the beams in different contexts. The approach could also integrate other MEP (mechanical, electrical, plumbing) elements such as piping, dampers, etc. Other objectives could be integrated in the method such as vibration comfort, heat and sound insulation, environmental footprint, and construction cost. Finally, it would be interesting to include in the optimization the design of the duct layout itself instead of assuming it as we did here. In the end, these additions could lead to a complete, multi-faceted design optimization tool for ceiling-to-floor sandwiches that could be used by practitioners and included in building information modeling (BIM) tools.

#### **Acknowledgment**

The authors are grateful to Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada for the financial support through its IRC and CRD programs (IRCPJ 461745- 18 and RDCPJ 524504-18) as well as the industrial partners of the NSERC industrial chair on eco-responsible wood construction (CIRCERB).

# Conclusion

L'objectif de ce projet de maîtrise est de démystifier, modéliser et optimiser un assemblage plafond à plancher dans un bâtiment en bois. La démystification a été basée sur une revue de la littérature et sur l'expertise des experts industriels à travers des entrevues semi-dirigées. Cette première étape nous a guidés pour concevoir le modèle mathématique de l'espace plafond à plancher présenté dans le chapitre 3. Ce modèle a été composé de deux parties : une représente l'aspect structural de l'assemblage plafond à plancher et une autre modélise le système de distribution d'air qui passe à travers la structure. Les deux parties du modèle sont soumises à des contraintes. Ces dernières assurent la rigidité de la structure et garantissent que les règles de dimensionnement des structures en bois et du réseau de distribution d'air sont bien respectées. Afin d'optimiser le modèle conçu, plusieurs variables de design ont été prises en considération telles que la dimension de la chape en béton, le nombre des plis de la dalle en CLT, l'espace entre les poutres en BLC, les dimensions des poutres et des panneaux de la dalle ainsi que l'essence du bois utilisé. Le modèle a été couplé avec un algorithme d'optimisation afin de minimiser l'épaisseur de l'assemblage plafond à plancher ainsi que la perte de pression au niveau du réseau de distribution d'air qui passe dedans.

Le chapitre 1 a présenté les avantages et les défis du bois en tant qu'un matériau de construction. Il a présenté les différents types de système constructifs utilisés dans les constructions en bois notamment les systèmes en ossatures légères, les systèmes en bois massif ainsi que les systèmes hybrides. Dans ce chapitre, les différentes configurations possibles et les éléments de l'assemblage plafond à plancher ont été aussi classés. Cet assemblage peut prendre différentes formes, comme un étage complet ou partiel dans des bâtiments complexes (comme les hôpitaux et les laboratoires), ou des espaces d'un (1) mètre ou moins dans des bâtiments résidentiels ou des centres commerciaux. Dans ce dernier cas, les systèmes de mécanique de bâtiment, passent sous le plafond ou sur le plancher (caché par un plancher surélevé). Souvent, les espaces plafond à plancher, représentent des zones de conflits entre les éléments du bâtiment, principalement entre les éléments du système structural et les éléments de la mécanique du bâtiment où des défis de coordination s'imposent. Plusieurs solutions sont proposées pour mieux coordonner et éviter le conflit comme le retour d'expérience des concepteurs, la modélisation numérique 2D, 3D ou encore la modélisation numérique des informations du bâtiment (BIM).

Le chapitre 2 a présenté l'état de l'art des aspects de l'assemblage plafond à plancher tant dans la littérature que dans l'état actuel de l'industrie de construction. Les aspects couvrent les exigences en termes de sécurité structurale, d'insonorisation, de résistance au feu, de confort vibratoire et d'empreinte environnementale de l'espace plafond à plancher dans les bâtiments en bois. Ce chapitre a permis de comparer les apports de la littérature par rapport à ce qui est exécuté dans les industries ainsi qu'aux attentes des industrielles. Les



exigences des aspects de l'assemblage plafond à plancher visées par les chercheurs sont les mêmes que les industrielles respectent, par contre un grand écart entre les défis pratiques signalés par les industrielles que celles qui préoccupent les chercheurs. Les personnes interviewées affirment que le principal défi de l'espace plafond à plancher est de minimiser son encombrement et éviter les conflits entre la structure et les éléments de la mécanique du bâtiment. En contrepartie, la littérature scientifique étudie et développe chaque discipline séparément. En fait, plusieurs travaux sont menés sur les aspects structural des espaces plafond à plancher en bois, mais ces études sont totalement indépendantes des travaux faits sur l'optimisation des systèmes de la mécanique du bâtiment.

Le chapitre 3 a détaillé le travail effectué sur le développement et l'optimisation d'un l'assemblage plafond à plancher. L'algorithme développé permet de concevoir la structure de l'assemblage plafond à plancher selon les règles de CSA O86. Il assure que la structure respecte les états limites de service et les états de limites ultimes. Il génère les meilleures configurations des variables de design permettant d'optimiser l'épaisseur de l'assemblage plafond à plancher. Il permet aussi de générer la distribution du réseau de ventilation selon la modélisation définie par l'utilisateur et le dimensionner en choisissant les diamètres des conduites donnant le minimum de perte de charge dans le système de distribution d'air. L'algorithme a été utilisé dans trois différents scénarios de coordination entre le réseau de distribution d'air et la structure. La première stratégie est de supposer que les poutres sont non renforcées et par la suite les diamètres des conduites qui passent à travers les poutres ne doivent pas dépasser 15 % de sa hauteur totale. La deuxième stratégie est de supposer que les poutres sont renforcées et par la suite, la tolérance de l'ouverture au niveau de la poutre passe jusqu'à 30% de sa hauteur. Finalement, dans la troisième stratégie aucune ouverture n'est acceptée dans les poutres et par la suite le réseau de ventilation passe en dessous de la structure. L'algorithme teste aussi l'effet de changer la configuration de distribution de réseau de ventilation sur les résultats d'optimisation des fonctions objectifs. Les résultats ont montré que la configuration avec superposition des conduites et structure est toujours meilleure pour la réduction de l'épaisseur de l'assemblage et la minimisation de la perte de pression au niveau de réseau de ventilation par rapport aux configurations avec et sans renforcement des poutres, et ce, pour les différents cas des réseaux de distribution d'air testés. En outre, la structure avec renforcement offre un gain considérable par rapport à celle non renforcée, un gain de plus que 0.6 m, pour une même valeur de perte de pression.

En guise de conclusion des résultats obtenus dans ce mémoire, on constate que l'assemblage plafond à plancher est un système multidisciplinaire. C'est un fruit de collaboration d'une équipe d'ingénierie. Il est spécifique à chaque projet, dépendant des conditions externes (positionnement du bâtiment et volonté du client d'avoir un certain type de design), ainsi que des conditions internes (sécurité et confort des occupants de l'espace). Malgré les cadres normatifs exigeants, il reste encore des solutions innovantes à découvrir permettant d'améliorer la conception optimale des éléments de cet espace. Rigidifier la structure en utilisant des poutres renforcées est parmi les solutions recommandées par les industriels et qui ont été aussi obtenues par

l'algorithme développé dans ce projet. Utiliser des structures hybrides (dans notre cas deux types de bois : CLT et BLC ainsi que le béton) ou mélanger le bois avec d'autres matériaux comme le béton ou le fer permet aussi d'apporter des bénéfices structureaux comme l'amélioration du niveau de confort vibratoire. La configuration du réseau de ventilation joue elle aussi un rôle important tant sur la structure que sur l'efficacité du système de la mécanique de bâtiment. Minimiser le croisement entre les poutres et les sections de conduite permet d'un côté d'avoir des structures rigides non trouées, mais pénalise l'efficacité du réseau de distribution d'air puisqu'un changement de direction de conduite entraîne une perte de pression.

Pour de futurs travaux de recherche, il serait intéressant d'améliorer encore plus le modèle développé en ajoutant d'autres aspects au modèle de l'assemblage plafond à plancher comme l'aspect vibratoire, sonore, la résistance au feu, le transfert thermique, ou encore d'ajouter d'autres éléments à l'assemblage comme un plafond suspendu ou bien des planchers esthétiques ou encore plus d'optimiser la disposition de l'assemblage en modifiant la position des conduites ainsi que celle des poutres. Il serait aussi important d'améliorer le calcul structural, par exemple au lieu de se baser sur des recommandations des manufacturiers pour dimensionner les ouvertures des poutres, un modèle par éléments finis pourrait déterminer plus précisément la tolérance de ces ouvertures. Enfin, l'algorithme développé pourrait être testé sur tous les étages du bâtiment (les charges sont différentes d'un étage à un autre) afin d'apprécier le gain d'un tel algorithme dans tout un bâtiment.

# Bibliographie

- [1] Consommation énergétique des bâtiments, Wikipédia. (2021). [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Consommation\\_%C3%A9nerg%C3%A9tique\\_des\\_b%C3%A2timents&oldid=186558496](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Consommation_%C3%A9nerg%C3%A9tique_des_b%C3%A2timents&oldid=186558496) (accessed November 26, 2021).
- [2] R. naturelles Canada, Efficacité énergétique des nouveaux bâtiments, (2018). <https://www.rncan.gc.ca/efficacite-energetique/efficacite-energetique-batiments/efficacite-energetique-des-nouveaux-batiments/20674> (accessed November 26, 2021).
- [3] Armand-Decker et al. - Optimisation multi-objectif de planchers intermédiaires bois tenant compte d'objectifs mécaniques et environnementaux.
- [4] S. Armand-Decker, T. Garnesson, P. Galimard, A. Ndiaye, A. Sempey, P. Lagière, F. Bos, Optimisation multi-objectif de planchers intermédiaires bois tenant compte d'objectifs mécaniques et environnementaux.
- [5] Evolution du marché de la construction de maisons ossature bois | Natilia Nantes Sud,. <https://nantes-sud.maison-natilia.fr/actualites/evolution-du-marche-de-la-construction-de-maisons-ossature-bois> (accessed February 16, 2023).
- [6] La charpente de maison. <https://www.larenovation.ca/renover/charpente/> (accessed February 16, 2023).
- [7] A. Buchanan, Energy and CO2 Advantages of Wood for Sustainable Buildings, University of Canterbury
- [8] CECO-3873\_Guide technique sur la construction modulaire en bois, centre d'expertise sur la construction en bois LR08.
- [9] D. Moroder, T. Smith, S. Pampanin, A. Palermo, A.H. Buchanan, Design of floor diaphragms in multi-storey timber buildings.
- [10] Moroder, Daniel\_Floor diaphragms in multi-storey timber buildings, PhD Thesis, University of Canterbury, new Zealand (2016).
- [11] S. Armand-Decker, T. Garnesson, P. Galimard, A. Ndiaye, A. Sempey, P. Lagière, F. Bos, Optimisation multi-objectif de planchers intermédiaires bois tenant compte d'objectifs mécaniques et environnementaux.
- [12] J.A.J. Huber, M. Ekevad, U.A. Girhammar, S. Berg, Structural robustness and timber buildings – a review, Wood Material Science & Engineering. 14 (2019) 107–128. <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1446052>.
- [13] A. Hossain, I. Danzig, T. Tannert, Cross-Laminated Timber Shear Connections with Double-Angled Self-Tapping Screw Assemblies, J. Struct. Eng. 142 (2016) 04016099. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001572](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001572).
- [14] C. Viau, Investigation and Optimization of Connections in Timber Assemblies Subjected to Blast Loading 430.
- [15] E. Poirier, M. Moudgil, A. Fallahi, S. Staub-French, T. Tannert, design and construction of a 53-meter-tall timber building at the university of british columbia, 10.
- [16] A. Fallahi, E.A. Poirier, S. Staub-French, J. Glatt, N. Sills, Designing for Pre-Fabrication and Assembly in the Construction of UBC's Tall Wood Building.
- [17] CECO-EtudeCas-Arbora-Web. <https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/10/CECO-EtudeCas-Arbora-Web.pdf> (accessed August 1, 2022).
- [18] A. Khanzode, benefits and lessons learned of implementing building virtual design and construction (vdc) technologies for coordination of mechanical, electrical, and plumbing (mep) systems on a large healthcare project.

- [19] P. Baradaran-Noveiri, M. Zaheeruddin, S. Hyeok Han, A BIM-Based Approach for Optimizing HVAC Design and Air Distribution System Layouts in Panelized Houses, in: Kitakyushu, Japan, 2020. <https://doi.org/10.22260/ISARC2020/0047>.
- [20] Le bois partout, pour tout dans le secteur de la construction | WSP, (n.d.). <https://www.wsp.com/fr-GL/hubs/bois> (accessed June 26, 2022).
- [21] Pourquoi construire en bois, Cecobois. <https://cecobois.com/pourquoi-construire-en-bois/> (accessed June 26, 2022).
- [22] Politique d'intégration du bois dans la constructi. [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/forets-faune-parcs/publications-adm/politiques/PO\\_Construction\\_bois\\_MFFP.pdf?1608213707](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/forets-faune-parcs/publications-adm/politiques/PO_Construction_bois_MFFP.pdf?1608213707) (accessed August 8, 2022).
- [23] Sokoudjo - MONTRÉAL, LE 14 DÉCEMBRE 202. [https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2881/1/MESSA\\_SOKOUDJO\\_Virginie\\_Raissa.pdf](https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2881/1/MESSA_SOKOUDJO_Virginie_Raissa.pdf) (accessed August 8, 2022).
- [24] La construction en bois réduit les gaz à effet de serre, Le Soleil. (2019). <https://www.lesoleil.com/2019/02/09/la-construction-en-bois-reduit-les-gaz-a-effet-de-serre-917e2f8ec5ca2eba6381d0c0e7fe091c> (accessed February 26, 2023).
- [25] Le bois : un matériau de premier choix en construction industrielle, L'Hebdo Journal. (2020). <https://www.lhebdojournal.com/publireportages/le-bois-un-materiau-de-premier-choix-en-construction-industrielle/> (accessed August 8, 2022).
- [26] Le bois et son isolation thermique - AFSQ, Association forestière du sud du Québec. (n.d.). <https://afsq.org/information-foret/bois/constructions-en-bois/bois-isolant-thermique/> (accessed August 8, 2022).
- [27] Gosselin et al. - Main Motivations and Barriers for Using Wood [http://www.simagi.polymtl.ca/congresgi/cigi2015/Articles/CIGI\\_2015\\_submission\\_116.pdf](http://www.simagi.polymtl.ca/congresgi/cigi2015/Articles/CIGI_2015_submission_116.pdf) (accessed August 10, 2022).
- [28] A. Gosselin, P. Blanchet, N. Lehoux, Y. Cimon, Main Motivations and Barriers for Using Wood in Multi-Story and Non-Residential Construction Projects, *BioResources*. 12 (2016) 546–570. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.546-570>.
- [29] Détails de conception, durabilité et protection : résistance au feu du bois, Cecobois. <https://cecobois.com/details-de-conception-durabilite-et-protection/la-resistance-au-feu-du-bois/> (accessed May 17, 2021).
- [30] Les propriétés acoustiques du bois, Puuinfo <https://puuinfo.fi/puutieto/le-bois-en-tant-que-materiau/les-proprietes-acoustiques-du-bois/?lang=fr> (accessed August 9, 2022).
- [31] Bâtiments de construction massive en bois d'au plus 12 étages, ISBN (PDF) : 978-2-550-72476-6.(2015)
- [32] C. Faye, C. Guigou, C. Coguenanff, Comportement vibratoire et acoustique des planchers bois soumis à la marche Étude du contexte européen.
- [33] Goverse et al. - 2001 - Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints, *Resources, Conservation and Recycling* 34 (2001) 53–74
- [34] Systèmes structuraux - ossature légère en bois, Cecobois. <https://cecobois.com/systemes-structuraux/ossature-legere-en-bois/> (accessed June 26, 2022).
- [35] Guide technique sur la conception de bâtiments à ossature légère en bois, Centre d'expertise sur la construction en bois.
- [36] Les avancées de l'ossature légère en bois, Voir vert - Le portail du bâtiment durable au Québec. <https://www.voirvert.ca/nouvelles/dossiers/les-avancees-lossature-legere-bois> (accessed June 26, 2022).
- [37] Baradaran-Noveiri et al. - 2020 - A BIM-Based Approach for Optimizing HVAC Design an.pdf.

- [38] Systèmes constructifs bois, CND. <https://cnadb.org/ressources/systemes-constructifs-bois-ouvrages-realizations/> (accessed June 26, 2022).
- [39] Les systèmes structuraux les plus courants, Puuinfo. <https://puuinfo.fi/puutieto/construire-en-bois/les-systemes-structuraux-les-plus-courants/?lang=fr> (accessed August 9, 2022).
- [40] Quels sont les différents systèmes constructifs bois ?, BLOG CONSTRUCTION. (2016). <https://www.spinellibois.fr/construction-bois/differents-systemes-constructifs-bois/> (accessed June 26, 2022).
- [41] Canadian CLT Handbook, 2019 Edition, National Library of Canada, 2020.
- [42] Optimiser sa structure en bois grâce à l'hybridation, Cecobois. <https://cecobois.com/actualites/optimiser-sa-structure-en-bois-grace-a-lhybridation/> (accessed June 26, 2022).
- [43] Interstitial space (architecture), Wikipedia. (2022). [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Interstitial\\_space\\_\(architecture\)&oldid=1091830491](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Interstitial_space_(architecture)&oldid=1091830491) (accessed July 31, 2022).
- [44] S.L. Leary, J.S. Meyer, Interstitial Mechanical Space, in: Planning and Designing Research Animal Facilities, Elsevier, 2009: pp. 129–133.
- [45] Accommodating MEP in Exposed Mass Timber Buildings, WoodWorks | Wood Products Council. <https://www.woodworks.org/resources/accommodating-mep-in-exposed-mass-timber-buildings/> (accessed June 26, 2022).
- [46] Timber architecture, Architectural section, Wood architecture, Pinterest. <https://www.pinterest.com/pin/timber-architecture-architectural-section-wood-architecture--476748310539004399/> (accessed June 26, 2022).
- [47] Wang et al. - 2016 - Building information modeling-based integration.
- [48] A.C. Megri, Y. Yu, Study of residential underfloor air distribution (UFAD) systems using a new modelling approach, Indoor and Built Environment. 26 (2017) 5–20. <https://doi.org/10.1177/1420326X15597544>.
- [49] H. Jin, F. Bauman, T. Webster, Testing and Modeling of Underfloor Air Supply Plenums, ASHRAE Transactions. (n.d.) 12.
- [50] P. Kattan, K. Ghali, M. Al-Hindi, Modeling of under-floor heating systems: A compromise between accuracy and complexity, (n.d.) 14.
- [51] J. Wang, X. Wang, W. Shou, H.-Y. Chong, J. Guo, Building information modeling-based integration of MEP layout designs and constructability, Automation in Construction. 61 (2016) 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.10.003>.
- [52] Korman et Tatum - 2006 - Prototype Tool for Mechanical, Electrical, and Plu.
- [53] Passage de la CAO 2D traditionnelle au BIM. <https://mep.trimble.com/fr/resources/blog/passage-de-la-cao-2d-traditionnelle-au-bim> (accessed August 29, 2022).
- [54] Conception assistée par ordinateur, Wikipédia. (2022). [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Conception\\_assist%C3%A9e\\_par\\_ordinateur&oldid=195726076](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Conception_assist%C3%A9e_par_ordinateur&oldid=195726076) (accessed August 29, 2022).
- [55] BIM : un virage obligé pour la construction, Substance ÉTS. (2021). <https://substance.etsmtl.ca/bim-virage-oblige-construction> (accessed June 26, 2022).
- [56] <https://www.facebook.com/BouthilletteParizeau/photos/pcb.1758918064251882/1758916087585413/> (accessed August 29, 2022).
- [57] 2019 - 2019 Global Status Report for Buildings and Constr. <https://www.worldgbc.org/sites/default/files/2019%20Global%20Status%20Report%20for%20Buildings%20and%20Construction.pdf> (accessed May 17, 2021).

- [58] J. Chapman, CROSS LAMINATED TIMBER CONSTRUCTION FOR RESISTING LATERAL LOADS ON SIX LEVEL BUILDINGS, 18 (n.d.) 8.
- [59] De plus en plus de bois dans la construction | JDQ, (n.d.). <https://www.journaldequebec.com/2018/11/17/de-plus-en-plus-de-bois-dans-la-construction> (accessed May 17, 2021).
- [60] Interstitial space (architecture), Wikipedia. (2020). [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Interstitial\\_space\\_\(architecture\)&oldid=957752804](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Interstitial_space_(architecture)&oldid=957752804) (accessed May 17, 2021).
- [61] CECO-12415\_Guide\_batiments\_municipaux\_Fev2019\_LR. [https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/04/CECO-12415\\_Guide\\_batiments\\_municipaux\\_Fev2019\\_LR.pdf](https://cecobois.com/wp-content/uploads/2020/04/CECO-12415_Guide_batiments_municipaux_Fev2019_LR.pdf) (accessed May 17, 2021).
- [62] J. Weckendorf, T. Toratti, I. Smith, T. Tannert, Vibration serviceability performance of timber floors, *Eur. J. Wood Prod.* 74 (2016) 353–367. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0976-z>.
- [63] In structural engineering, what is meant by serviceability limit state and ultimate limit state? - Quora, (n.d.). <https://www.quora.com/In-structural-engineering-what-is-meant-by-serviceability-limit-state-and-ultimate-limit-state> (accessed May 17, 2021).
- [64] M. De Munck, S. De Sutter, S. Verbruggen, T. Tysmans, R.F. Coelho, Multi-objective weight and cost optimization of hybrid composite-concrete beams, *Composite Structures*. 134 (2015) 369–377. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.089>.
- [65] T. Kalamees, Ü. Alev, M. Pärnalaas, Air leakage levels in timber frame building envelope joints, *Building and Environment*. 116 (2017) 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.011>.
- [66] T.-O. Relander, G. Bauwens, S. Roels, J.V. Thue, S. Uvsløkk, The influence of structural floors on the airtightness of wood-frame houses, *Energy and Buildings*. 43 (2011) 639–652. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.005>.
- [67] Glisovic et Stevanovic - vibrational behaviour of timber floors.
- [68] S. Schoenwald, B. Zeitler, I. Sabourin, F. King, Sound insulation performance of Cross Laminated Timber Building Systems, 11.
- [69] F.S. Bauman, H. Jin, T. Webster, Heat Transfer Pathways in Underfloor Air Distribution (UFAD) Systems, *ASHRAE Transactions*. 5.
- [70] X. Meng, J. Du, Y. Wang, Y. Gao, Thermal performance optimization of building floors under air-conditioning intermittent operation by numerical simulation, *Journal of Building Physics*. 43 (2019) 99–120. <https://doi.org/10.1177/1744259119833401>.
- [71] O.A.B. Hassan, F. Öberg, E. Gezelius, Cross-laminated timber flooring and concrete slab flooring: A comparative study of structural design, economic and environmental consequences, *Journal of Building Engineering*. 26 (2019) 100881. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100881>.
- [72] S. Jorens, I. Verhaert, K. Sörensen, Design optimization of air distribution systems in non-residential buildings, *Energy and Buildings*. 175 (2018) 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.018>.
- [73] N. Lu, T. Korman, Implementation of Building Information Modeling (BIM) in Modular Construction: Benefits and Challenges, in: *Construction Research Congress 2010*, American Society of Civil Engineers, Banff, Alberta, Canada, 2010: pp. 1136–1145. [https://doi.org/10.1061/411109\(373\)114](https://doi.org/10.1061/411109(373)114).
- [74] C. Faye, Comportement vibratoire et acoustique des planchers bois soumis à la marche Etude de contexte européen.

- [75] Détails de conception, durabilité et protection : le bois et le confort acoustique, Cecobois. <https://cecobois.com/details-de-conception-durabilite-et-protection/le-bois-et-le-confort-acoustique/> (accessed May 17, 2021).
- [76] A. Homb, S.T. Kolstad, Evaluation of floor vibration properties using measurements and calculations, *Engineering Structures*. 175 (2018) 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.091>.
- [77] Benefits of Using Wood, (n.d.). <https://www.hyne.com.au/why-timber/benefits-of-wood> (accessed May 27, 2021).
- [78] Manuel canadien sur le CLT, Édition 2019, Format électronique (Volumes I et II), FPIInnovation, ISBN 978-0-86488-606-4, Publication spéciale SP-532F.
- [79] I. Glisovic, b. Stevanovic, Vibrational behaviour of timber floors, world conference on timber engineering (2010).
- [80] L.J. Hu, Y.H. Chui, D.M. Onysko, Vibration serviceability of timber floors in residential construction, *Prog. Struct. Engng Mater.* 3 (2001) 228–237. <https://doi.org/10.1002/pse.69>.
- [81] Hamm et al. - Floor vibrations – new result world conference on timber engineering (2015).
- [82] K. Jarnerö, A. Brandt, A. Olsson, Vibration properties of a timber floor assessed in laboratory and during construction, *Engineering Structures*. 82 (2015) 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.019>.
- [83] H. Huang, Y. Gao, W.-S. Chang, Human-induced vibration of cross-laminated timber (CLT) floor under different boundary conditions, *Engineering Structures*. 204 (2020) 110016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110016>.
- [84] D. Casagrande, I. Giongo, F. Pederzoli, A. Franciosi, M. Piazza, Analytical, numerical and experimental assessment of vibration performance in timber floors, *Engineering Structures*. 168 (2018) 748–758. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.020>.
- [85] A. Hassanieh, A.A. Chiniforush, H.R. Valipour, M.A. Bradford, Vibration behaviour of steel-timber composite floors, part (2): Evaluation of human-induced vibrations, *Journal of Constructional Steel Research*. 158 (2019) 156–170. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.03.026>.
- [86] A. A. Chiniforush, M. Makki Alamdari, U. Dackermann, H.R. Valipour, A. Akbarnezhad, Vibration behaviour of steel-timber composite floors, part (1): Experimental & numerical investigation, *Journal of Constructional Steel Research*. 161 (2019) 244–257. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.07.007>.
- [87] C. SilentFX, SilentFX® Noise-Reducing Gypsum Board, 20.
- [88] Airborne Noise Simply Explained, Soundproof Direct. (2017). <https://soundproofdirect.com/airborne-noise-explained/> (accessed May 17, 2021).
- [89] Joli-Cœur « L'insonorisation devient une préoccupation. [https://www.acousti-tech.com/Design/PDF/M-1323\\_Demystifier\\_I\\_acoustique](https://www.acousti-tech.com/Design/PDF/M-1323_Demystifier_I_acoustique). (accessed May 17, 2021).
- [90] F. Asdrubali, B. Ferracuti, L. Lombardi, C. Guattari, L. Evangelisti, G. Grazieschi, A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications, *Building and Environment*. 114 (2017) 307–332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>.
- [91] T. Beresford, J. Chen, Floor airborne and impact sound insulation performance of cross laminated timber vs. timber joist and concrete systems, (2018) 9.
- [92] C. Martins, P. Santos, P. Almeida, L. Godinho, A. Dias, Acoustic performance of timber and timber-concrete floors, *Construction and Building Materials*. 101 (2015) 684–691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.142>.
- [93] J. Brunskog, P. Hammer, Prediction Models of Impact Sound Insulation on Timber Floor Structures; A Literature Survey, *Building Acoustics*. 7 (2000) 89–112. <https://doi.org/10.1260/1351010001501525>.

- [94] J. Mahn, The Optimization of a Wooden Floor Design Based on Validated Finite Element Models, (2014) 5.
- [95] I. Lukić, M. Premrov, Ž.V. Leskovar, A. Passer, Assessment of the environmental impact of timber and its potential to mitigate embodied GHG emissions, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 588 (2020) 022068. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/2/022068>.
- [96] J. Li, B. Rismanchi, T. Ngo, Feasibility study to estimate the environmental benefits of utilising timber to construct high-rise buildings in Australia, Building and Environment. 147 (2019) 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.052>.
- [97] Determining Above Ceiling Space Requirements for MEP Systems, (n.d.). <https://www.questdg.com/blog/2016/05/31/mechanical/determining-above-ceiling-space-requirements-for-mep-systems/> (accessed May 25, 2021).
- [98] Plenum space, Wikipedia. (2020). [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Plenum\\_space&oldid=997018819](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Plenum_space&oldid=997018819) (accessed May 25, 2021).
- [99] N. Lu, T.M. Korman, Opportunities for Advancement of Modular Construction Projects using Building Implementation Modeling (BIM), (n.d.) 7.
- [100] M.C.E. Manuel, P.T. Lin, M. Chang, Optimal duct layout for HVAC using topology optimization, Science and Technology for the Built Environment. 24 (2018) 212–219. <https://doi.org/10.1080/23744731.2017.1346444>.
- [101] Y. Asiedu, R. Besant, P. Gu, HVAC Duct System Design Using Genetic Algorithms, HVAC&R Res. 6 (2000) 149–173. <https://doi.org/10.1080/10789669.2000.10391255>.
- [102] T. Kim, J.D. Spitler, R.D. Delahoussaye, Optimum Duct Design for Variable Air Volume Systems, Part 2: Optimization of VAV Duct Systems, ASHRAE Transactions.24.
- [103] R. Gagnon, L. Gosselin, S. Armand Decker, Performance of a sequential versus holistic building design approach using multi-objective optimization, Journal of Building Engineering. 26 (2019) 100883. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100883>.
- [104] Mechanical Shaft Definition - What Does it Mean in Construction?, Builder-Questions.Com. (n.d.). <https://www.builder-questions.com/construction-glossary/mechanical-shaft/> (accessed April 9, 2022).
- [105] S. Bougrine, L. Gosselin, ceiling-to-floor sandwich in timber buildings: comparing literature and what experts say on design and performance of this multifaceted space. TE0604 (2021)
- [106] P. Kattan, K. Ghali, M. Al-Hindi, Modeling of under-floor heating systems: A compromise between accuracy and complexity.
- [107] Y. Yuan, X. Zhou, X. Zhang, Numerical and experimental study on the characteristics of radiant ceiling systems, Building Research & Information. 47 (2019) 912–927. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1617668>.
- [108] H. Jin, F. Bauman, T. Webster, Testing and Modeling of Underfloor Air Supply Plenums, ASHRAE Transactions.
- [109] S. Jorens, K. Sørensen, I. Verhaert, A. De Corte, Air distribution system design optimization in non-residential buildings: Problem formulation and generation of test networks, Journal of Building Engineering. 12 (2017) 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.05.006>.
- [110] Kritmaitree - 2003 - Modified T-Method duct design for use in Thailand, Department of Mechanical Engineering, Chu (2003).
- [111] K.F. Fong, S.Y. Yuen, C.K. Chow, S.W. Leung, Energy management and design of centralized air-conditioning systems through the non-revisiting strategy for heuristic optimization methods, Applied Energy. 87 (2010) 3494–3506. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.002>.



- [112] S. Jorens, I. Verhaert, K. Sorensen, Design optimization of air distribution systems in non-residential buildings, *Journal of Energy & Buildings* <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.018> (2018).
- [113] T. Kim, J.D. Spittler, R.D. Delahoussaye, Optimum Duct Design for Variable Air Volume Systems, Part 1: Problem Domain Analysis of VAV Duct Systems, *ASHRAE Transactions*. (n.d.) 10.
- [114] Technical Guide for the Design and Construction of Tall Wood Buildings in Canada - SP-543E-2022.
- [115] J. Weckendorf, G. Hafeez, G. Doudak, I. Smith, Floor Vibration Serviceability Problems in Wood Light-Frame Buildings, *J. Perform. Constr. Facil.* 28 (2014) A4014003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000538](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000538).
- [116] B. Östman, D. Brandon, H. Frantzich - Fire safety engineering in timber buildings, 0379-7112, (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.002>.
- [117] M. Caniato, F. Bettarello, A. Ferluga, L. Marsich, C. Schmid, P. Fausti, Acoustic of lightweight timber buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 80 (2017) 585–596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.110>.
- [118] A. Dias, J. Skinner, K. Crews, T. Tannert, Timber-concrete-composites increasing the use of timber in construction, *Eur. J. Wood Prod.* 74 (2016) 443–451. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0975-0>.
- [119] D. Yeoh, M. Fragiaco, M. De Franceschi, K. Heng Boon, State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures: Literature Review, *J. Struct. Eng.* 137 (2011) 1085–1095. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000353](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000353).
- [120] P. Jelusic, S. Kravanja, Optimal design of timber-concrete composite floors based on the multi-parametric MINLP optimization, *Composite Structures*. 179 (2017) 285–293. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.062>.
- [121] I.I. Forgues Daniel, BIM : un virage obligé pour la construction, *Substance ÉTS*. (2021). <https://substance.etsmtl.ca/bim-virage-oblige-construction> (accessed March 4, 2023).
- [122] Manuel canadien sur le CLT, Édition 2019, Format électronique (Volumes I et II), FPInnovation, ISBN 978-0-86488-606-4, Publication spéciale SP-532F (2019).
- [123] Canadian CLT Handbook, 2019 Edition, Digital Format (Volume I & II), FPInnovation, ISBN 978-0-86488-592-0, Special Publication SP-532E (2020).
- [124] Nordic Structures, Ouvertures dans les poutres Nordic Lam+, NS-NT504-CA-fr (1/1) | Version : 2020-05-20 (2020).
- [125] R. Gagnon, L. Gosselin, S. Park, S. Stratbücker, S. Decker, Comparison between two genetic algorithms minimizing carbon footprint of energy and materials in a residential building, *Journal of Building Performance Simulation*. 12 (2019) 224–242. <https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1501095>.
- [126] W. Gong, Q. Duan, J. Li, C. Wang, Z. Di, A. Ye, C. Miao, Y. Dai, Multiobjective adaptive surrogate modeling-based optimization for parameter estimation of large, complex geophysical models: multiobjective adaptive surrogate-based optimization, *water Resour. Res.* 52 (2016) 1984–2008. <https://doi.org/10.1002/2015WR018230>.
- [127] A.U. Weerasuriya, X. Zhang, J. Wang, B. Lu, K.T. Tse, C.-H. Liu, Performance evaluation of population-based metaheuristic algorithms and decision-making for multi-objective optimization of building design, *Building and Environment*. 198 (2021) 107855. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107855>.
- [128] N. Riquelme, C. Von Lucken, B. Baran, Performance metrics in multi-objective optimization, in: 2015 Latin American Computing Conference (CLEI), IEEE, Arequipa, Peru, 2015: pp. 1–11. <https://doi.org/10.1109/CLEI.2015.7360024>.

- [129] S. Mirjalili, P. Jangir, S.Z. Mirjalili, S. Saremi, I.N. Trivedi, Optimization of problems with multiple objectives using the multi-verse optimization algorithm, *Knowledge-Based Systems*. 134 (2017) 50–71. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.07.018>.
- [130] S. Groleau, *Origine, Pointe-aux-lièbres ecocondos*, Quebec City, Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois (2018).
- [131] F.C. McQuiston, J.D. Parker, J.D. Spitler, *Heating, Ventilating, and Air Conditioning: Analysis and Design*, Wiley, 2019. [https://books.google.ca/books?id=-\\_zKDwAAQBAJ](https://books.google.ca/books?id=-_zKDwAAQBAJ).
- [132] R. and A.-C.E. American Society of Heating, 2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals, ASHRAE, 2009. <https://books.google.ca/books?id=EqjpswEACAAJ>.

# Annexe A : Questionnaires des entrevues semi-dirigées

## Questionnaire d'entrevue semi-dirigée – Architecte

### Objectif de la rencontre

- Comprendre les enjeux de la conception de l'espace plafond à plancher d'un bâtiment institutionnel ou commercial.
- Comprendre les exigences minimales du CNB au niveau de la conception de l'espace plafond à plancher.
- Déterminer les composants du système plafond à plancher pouvant être optimisés et les limites de cette optimisation.
- Déterminer les outils utilisés présentement par l'industrie pour la modélisation de ces espaces.
- Valider notre compréhension des informations lues dans la littérature.

### Mise en contexte:

- Présentation du projet de recherche, des objectifs et de sa durée.
- Permission d'enregistrer.

### Volume et éléments d'un système plafond à plancher

1. Comment définissez-vous un espace entre un plafond et un plancher?
2. Quels sont les éléments de base (architecturaux et autres) de cet espace?
3. Quel type d'espace plafond à plancher associez-vous à quel type de bâtiment?
4. Y a-t-il une limite minimale ou maximale pour la distance entre un plafond et un plancher ?
5. Est-ce que vous intervenez dans le choix et la nature du matériau dans les constructions en bois et quelle est l'influence de choisir la construction en bois sur l'espace plafond à plancher?
6. Quels seraient selon vous les bénéfices et les inconvénients d'une réduction du volume occupé par l'espace plafond à plancher?

### Les exigences dans la construction en termes de sécurité et du confort

1. Quels sont les critères et les indices de performance pour un espace plafond à plancher sécuritaire? En termes de rigidité et de sécurité incendie?
2. De quelle façon prenez-vous en considération les notions de confort thermique, acoustique, vibratoire lors de la conception d'espace plafond à plancher?

### Outils de la modélisation

1. Quels sont les moyens utilisés pour la modélisation et la conception d'un espace plafond à plancher dans un bâtiment?
2. Utilisez-vous des maquettes numériques pour la modélisation?
3. Comment sont gérés les interférences et les conflits entre les différents éléments pendant le processus de modélisation et de conception (tuyauterie, structure, etc.)?

## Questionnaire d'entrevue semi-dirigée – Ingénieur génie civil

### Objectif de la rencontre

- Comprendre les enjeux de la conception de la structure de l'espace plafond à plancher d'un bâtiment institutionnel ou commercial.
- Déterminer les composants structuraux du système plafond à plancher pouvant être optimisés et les limites de cette optimisation.
- Comprendre les exigences minimales garantissant la sécurité au niveau de la structure de l'espace plafond à plancher.
- Déterminer les outils utilisés présentement par l'industrie pour la modélisation de ces espaces.

### Mise en contexte:

- Présentation du projet de recherche, des objectifs et de sa durée.
- Permission d'enregistrer.

### Volume et éléments d'un système plafond à plancher

1. Comment définissez-vous l'espace entre le plafond et le plancher dans un bâtiment institutionnel ou commercial en bois ?
2. Quels sont les éléments structuraux de cet espace?
3. Y a-t-il une limite minimale ou maximale pour la distance entre un plafond et un plancher ?

### Les exigences de la construction des espaces plafond à plancher

1. Quelles sont les charges et les forces appliquées aux systèmes plafond à plancher ?
2. Quels sont les critères et les indices de performance d'un espace plafond à plancher pour une construction sécuritaire ? En termes de rigidité et de vibration?
3. Dans quelle mesure la fonction de la zone (laboratoire, corridor, bureau) influence-t-elle la conception de l'espace plafond à plancher?
4. Y a-t-il des influences du nombre d'étages sur la distance entre le plafond et le plancher ?
5. Y a-t-il des différences entre l'espace plafond à plancher d'un étage à un autre ?
6. Y a-t-il des recommandations ou des préférences dans le choix et la nature du matériau dans les constructions en bois ?
7. Quels seraient selon vous les bénéfices et les inconvénients d'une réduction du volume occupé par l'espace plafond à plancher?
8. Selon vous quels sont les éléments qui peuvent influencer le coût de la construction de l'espace plafond à plancher?

### Outils de la modélisation

1. Quels sont les moyens utilisés pour la modélisation et la conception d'un espace plafond à plancher dans un bâtiment?
2. Comment sont gérés les interférences et les conflits entre les différents éléments pendant le processus de modélisation et de conception (structure, tuyauterie, etc.)?

## **Questionnaire d'entrevue semi-dirigée – Ingénieur Mécanique**

### Objectif de la rencontre

- Comprendre les enjeux de la modélisation des conduites et des systèmes cvc dans l'espace plafond à plancher d'un bâtiment institutionnel ou commercial.
- Comprendre les exigences en termes de sécurité au niveau du positionnement des conduites dans l'espace plafond à plancher.
- Déterminer les limites de l'optimisation du positionnement des conduites entre le plafond et le plancher.
- Déterminer les outils utilisés présentement par l'industrie pour la modélisation des conduites et des systèmes cvc.
- Valider notre compréhension des informations lues dans la littérature.

### Mise en contexte:

- Présentation du projet de recherche, des objectifs et de sa durée.
- Permission d'enregistrer.

### Composants et volume de l'espace plafond à plancher

1. Comment définissez-vous un espace entre un plafond et un plancher?
2. Quels sont les éléments de l'espace plafond à plancher qui sont liés aux systèmes mécaniques?
3. Qui détermine le volume de l'espace plafond à plancher? À quel moment? Comment?

### Conduites dans un système plafond à plancher

1. Comment estimez-vous le volume nécessaire au passage des conduites dans un espace plafond à plancher?
2. Quel type d'espace plafond à plancher associez-vous à quel type d'espace occupé?
3. Dans quelle mesure la fonction de la zone (laboratoire, corridor, bureau) influence-t-il la conception de l'espace plafond à plancher?
4. Y a-t-il des règles et de bonnes pratiques quant au positionnement des tuyaux et des conduits dans un espace plafond à plancher?
5. Quelles sont les mesures de sécurité à considérer pour la conception du passage des conduits et des tuyaux dans un espace plafond à plancher?
6. Comment éviter l'encombrement et l'espace perdu entre les conduites?
7. Quelle est l'influence de l'isolation (sonore et thermique) des conduites de passage de l'eau chaude/froide et de l'air sur l'encombrement et sur le volume de l'espace plafond à plancher?
8. Quelles sont les fonctions des différentes conduites de l'espace plafond à plancher?

9. Y a-t-il des contre-indications au positionnement rapprochées des éléments dans l'espace plafond à plancher (ex.: bois vs tuyau chaud)?
10. Y a-t-il des conflits potentiels pour le passage des conduites au niveau de l'espace plafond à plancher?
11. Y a-t-il des problèmes dans l'espace plafond à plancher qui peuvent apparaître après le positionnement des conduites ?

#### Systemes CVCA

1. Y a-t-il une distance conventionnelle pour les systemes mecaniques situes au niveau de l'espace plafond à plancher?
2. Y a-t-il des approximations du nombre des conduites necessaire situees au niveau de l'espace plafond à plancher selon le type de systeme cvca ?
3. Quel serait l'impact d'utiliser un plancher ou un plafond radiant sur la conception de l'espace plafond à plancher ?

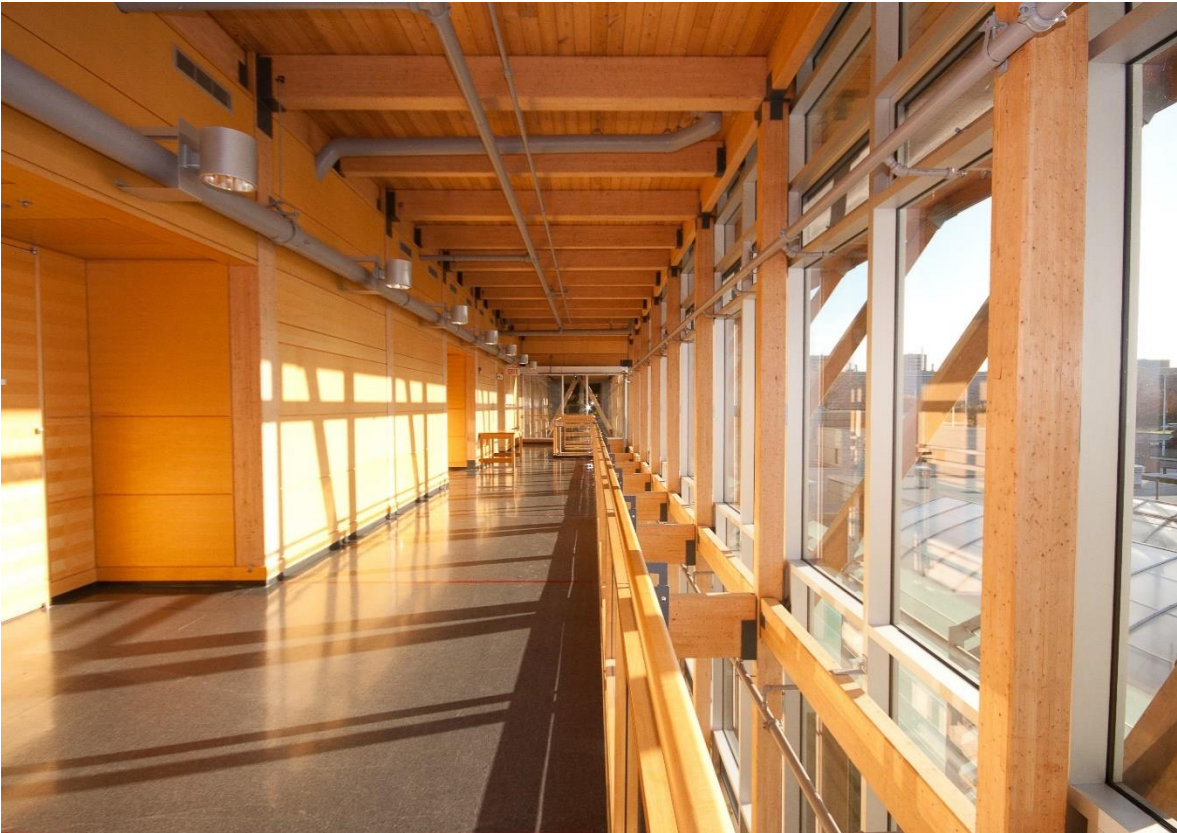
#### Outils de la modelisation

1. Quels sont les moyens utilises pour la modelisation et la conception de l'espace plafond à plancher d'un batiment?
  - a. Utilisez-vous des maquettes numeriques pour la modelisation?
2. Est-ce que la modelisation numerique permet-elle d'optimiser l'emplacement des conduites, d'eviter leur encombrement et d'organiser leur passage?
3. Comment sont geres les interferences et les conflits entre les differents elements pendant le processus de modelisation et de conception (tuyauterie, structure, etc.)?



## Annexe B : Article pour APCHQ

### Optimisation multi-objectif du système plafond à plancher dans les bâtiments en bois



*Crédit photo : Martine Lapointe, Faculté de foresterie, géographie et géomatique de l'Université Laval*

Améliorer la performance des bâtiments, c'est jongler avec l'optimisation de plusieurs paramètres. L'optimisation multi-objectif est un outil qui permet de tendre vers la solution idéale et de maximiser l'utilisation de l'espace et la configuration de l'assemblage.

La construction en bois a évolué au cours des dernières années et son développement s'accompagne d'une augmentation continue de la hauteur des bâtiments. En contrepartie, les règles d'urbanisme imposent des limitations de hauteur en fonction du site, ce qui engendre une forte pression pour maximiser l'utilisation de l'espace vertical et en particulier, celui consacré à autre chose que l'occupation humaine, notamment l'espace entre le plafond et le plancher.

Cet espace revêt une grande importance vu sa position dans le bâtiment ainsi que ses fonctionnalités multiples. D'une part, il fait partie du système structural du bâtiment et, d'autre part, il constitue un caisson par où passent les systèmes de la mécanique du bâtiment comme la ventilation et la plomberie. Réduire l'épaisseur de cet

espace a des répercussions importantes sur la hauteur totale du bâtiment puisque cet espace se répète à chaque étage. Cependant, cela peut alors nécessiter de plus petites gaines de ventilation, ce qui augmente les pertes de charge, et donc, la consommation d'énergie.

Est-il possible d'optimiser la configuration du sandwich « plafond à plancher » pour minimiser son épaisseur tout en permettant un passage adéquat des systèmes de la mécanique du bâtiment ? C'est dans l'objectif de répondre à cette question que Sabine Bougrine réalise un projet de maîtrise à la Chaire industrielle de recherche sur la construction écoresponsable en bois (CIRCERB) de l'Université Laval. Le projet est réalisé en génie mécanique, sous la direction du professeur Louis Gosselin.

Afin d'optimiser la configuration de l'assemblage, une méthode d'optimisation multiobjectif a été élaborée afin d'obtenir un ensemble de compromis entre deux objectifs concurrents : l'épaisseur de l'assemblage et la perte de pression au niveau du réseau de ventilation.

## **Système étudié**

Le système analysé dans la présente étude est composé d'une chape en béton sur une dalle en CLT, supportée par des poutres en bois lamellé-collé (BLC). Le réseau de ventilation peut passer dans la même épaisseur que les poutres en BLC, soit en parallèle à ces dernières, soit en les traversant. Afin de répondre aux exigences du Code de construction, des contraintes liées aux états limites ultimes et aux états de limites de services sont prises en considération. D'autres contraintes liées au dimensionnement des gaines de ventilation sont aussi respectées, notamment les vitesses de l'air dans les gaines. En particulier, une contrainte sur la taille maximale des ouvertures pratiquées dans les poutres pour le passage des gaines a été implémentée sur la base des fiches techniques de l'entreprise Nordic Structure.

Afin d'évaluer le modèle développé, un cas d'étude a été simulé. Dans celui-ci, l'épaisseur de la chape, les propriétés de la dalle en CLT (l'épaisseur et le nombre de plis), le type du bois, l'entraxe entre les poutres, la hauteur et la largeur des poutres ainsi que le diamètre des différentes sections de gaine de ventilation sont considérés comme des variables de conception.

La Figure B.1 montre un exemple de configuration en plan du système étudié. Le réseau de distribution d'air est représenté en bleu. Les cercles représentent des points-sources d'air. Les flèches sont les diffuseurs d'air. La structure est modélisée en gris. Les poutres sont disposées d'une façon parallèle les unes aux autres. L'algorithme d'optimisation multi-objectif tente de trouver les meilleures combinaisons des variables de conception de façon à minimiser simultanément l'épaisseur de l'assemblage et la perte de charge maximale dans les gaines.

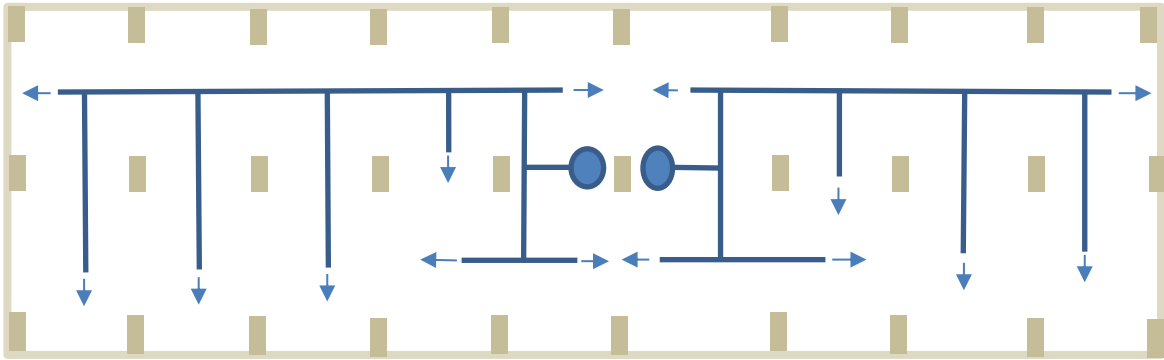


Figure B.1. Exemple de représentation schématique en vue de dessus du système structural (gris) et de la distribution d'air (bleu).

## Résultats et discussion

Les résultats de l'optimisation montrent que différentes solutions possibles respectent les critères de dimensionnement cités. Ces solutions peuvent être présentées sous la forme de ce qu'on appelle un front de Pareto (Figure B 2.a). Chaque point sur cette figure correspond à une des solutions trouvées par l'algorithme et illustre le compromis à faire entre l'épaisseur de l'assemblage (en  $x$ ) et la perte de charge (en  $y$ ). Selon la priorité accordée à la consommation d'énergie ou à l'épaisseur dans un projet donné, la personne responsable de la conception peut donc choisir l'une des solutions optimales sur le front de Pareto.

Une solution est une combinaison entre le nombre de plis de la dalle en CLT ( $n$ ), l'épaisseur transversale ( $e_{pt}$ ) et longitudinale ( $e_{pl}$ ) des panneaux de la dalle en CLT, l'épaisseur de la chape ( $be$ ), le type de dalle en CLT ( $tp$ ), l'entraxe entre les poutres ( $E$ ), la hauteur ( $hp$ ) et la largeur ( $lp$ ) des poutres, ainsi que le diamètre des gaines.

Des exemples de solutions liées aux variables de la conception structurale sont présentés à travers le diagramme de points (Figure B 2.b). Sur la Figure B 2.b, le point 9 (P9) est le point en noir sur le front de Pareto avec le maximum d'épaisseur, et le point 1 (P1) est le point avec le maximum de perte de pression dans le réseau de ventilation.

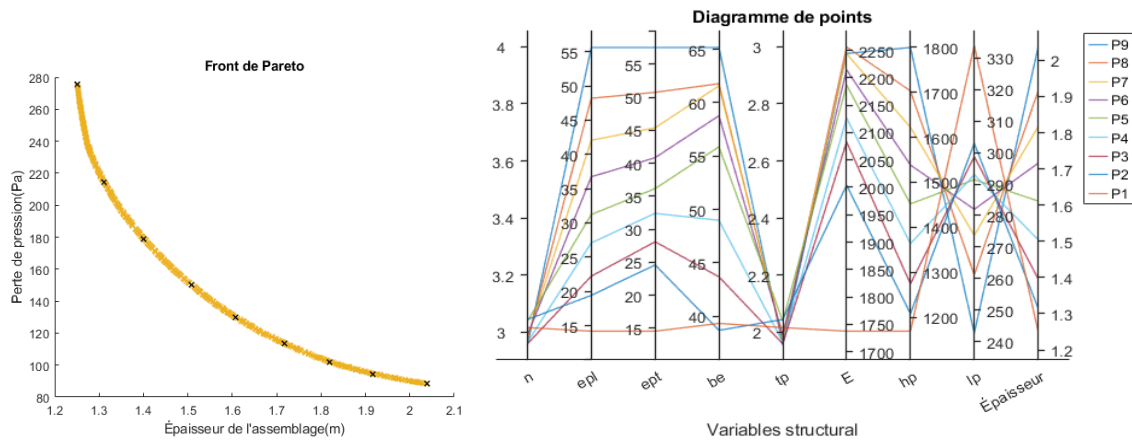


Figure B.2. a) Front de Pareto des solutions optimales, b) Diagramme de points montrant la configuration de 9 solutions choisies.

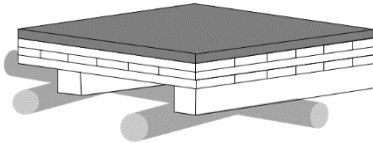
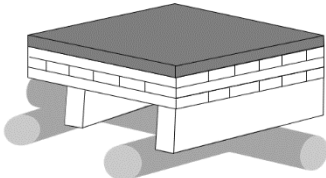
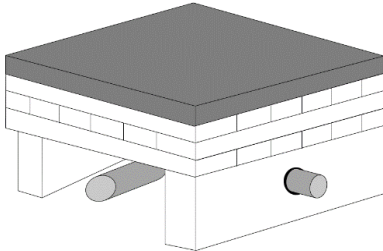
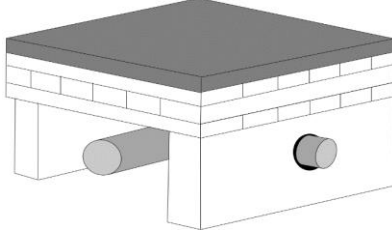
L'outil d'optimisation a été utilisé pour comparer trois stratégies au niveau des percements dans les poutres permettant d'accommoder le passage des gaines. Premièrement, nous avons considéré une situation où aucun percement n'est permis et par conséquent, les gaines doivent passer sous les poutres. La deuxième situation utilise des percements sans renforcement tant que leurs diamètres ne représentent pas plus de 15 % de la hauteur de la poutre. Finalement, nous avons aussi considéré des ouvertures avec renforcement, ce qui permet de tolérer des percements allant jusqu'à 30 % de la hauteur de la poutre.

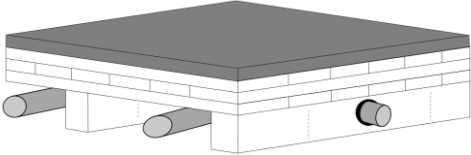
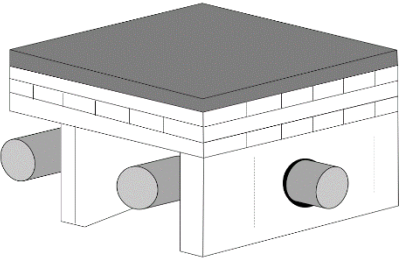
Les résultats ont montré que le scénario 3 (ouvertures avec renforcement) était plus bénéfique pour réduire l'épaisseur de l'assemblage par rapport au scénario 2 (ouvertures sans renforcement). La présence d'ouvertures sans renforcement (scénario 2) n'était pas aussi bénéfique par rapport au cas sans percement (scénario 1).

Dans le futur, l'outil développé pourra permettre de simuler divers assemblages. De plus, il pourra inclure d'autres objectifs importants en lien avec l'espace « plafond à plancher », comme l'acoustique, la sécurité incendie et les coûts.

## Annexe C : Exemples de solutions proposées

Nous présentons dans cette annexe quelques solutions données par l'algorithme d'optimisation. La représentation n'est pas à l'échelle, mais on a essayé de garder la différence visible entre les valeurs des variables de design d'une configuration à une autre. L'objectif est de rapprocher aux lecteurs les solutions d'une façon visuelle et leur permettre de comparer les solutions proposées par les différentes configurations.

Type de la configuration	Solutions avec épaisseur minimale	Solutions avec une perte de pression optimale
Traditionnelle (Superposition de la structure et le réseau de ventilation)	 <p>Représentation schématique d'un partie l'assemblage plafond-plancher optimisé (<math>\Delta P = 105 Pa</math>, <math>H_{tot} = 0.65m</math>).</p>	 <p>Représentation schématique d'un partie l'assemblage plafond-plancher optimisé (<math>\Delta P = 75 Pa</math>, <math>H_{tot} = 1.27 m</math>).</p>
Avec interférence de la poutre et de la conduite, structure sans renforcement.	 <p>Représentation schématique d'un partie l'assemblage plafond-plancher optimisé (<math>\Delta P = 280 Pa</math>, <math>H_{tot} = 1.2 m</math>).</p>	 <p>Représentation schématique d'un partie l'assemblage plafond-plancher optimisé (<math>\Delta P = 75 Pa</math>, <math>H_{tot} = 1.95 m</math>).</p>

<p>Avec interférence de la poutre et de la conduite, structure renforcée</p>	 <p>Représentation schématique d'un partie l'assemblage plafond-plancher optimisé (<math>\Delta P = 280 Pa</math>, <math>H_{tot} = 0.65 m</math>).</p>	 <p>Représentation schématique d'un partie l'assemblage plafond-plancher optimisé (<math>\Delta P = 75 Pa</math>, <math>H_{tot} = 1.05 m</math>).</p>
--	---	---